



TUGAS AKHIR - TL 141584

ANALISA NUMERIK PENGARUH UKURAN KOKAS  
TERHADAP DISTRIBUSI TEMPERATUR DAN TEKANAN  
*MINI BLAST FURNACE*

M. HIDAYATULLAH NUR  
NRP 2712 100 092

Dosen Pembimbing  
Dr. Sungging Pintowantoro, ST., MT.  
Dr.-Ing. Victor Yuardi Risonarta, ST., MSc.

JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2016

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



FINAL PROJECT - TL 141584

# NUMERICAL ANALYSIS OF COKES SIZE EFFECT ON THE TEMPERATURE AND PRESSURE DISTRIBUTION OF MINI BLAST FURNACE

M. HIDAYATULLAH NUR  
NRP 2712 100 092

Advisor

Dr. Sungging Pintowantoro, ST., MT.

Dr.-Ing. Victor Yuardi Risonarta, ST., MSc.

DEPARTMENT OF MATERIALS AND METALLURGICAL  
ENGINEERING

Faculty of Industrial Technology

Sepuluh Nopember Institute of Technology

Surabaya

2016

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# **ANALISA NUMERIK PENGARUH UKURAN KOKAS TERHADAP DISTRIBUSI TEMPERATUR DAN TEKANAN *MINI BLAST FURNACE***

## **TUGAS AKHIR**

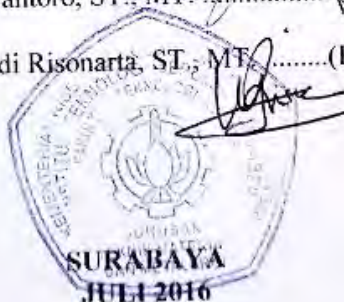
Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat  
memperoleh gelar Sarjana Teknik  
pada  
Bidang Studi Metalurgi Ekstraksi  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :  
**M. HIDAYATULLAH NUR**  
NRP. 2712 100 092

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

Dr. Sungging Pintowantoro, ST., MT. .... (Pembimbing I)

Dr.-Ing. Victor Yuardi Risonarta, ST., MT. .... (Pembimbing II)



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# ANALISA NUMERIK PENGARUH UKURAN KOKAS TERHADAP DISTRIBUSI TEMPERATUR DAN TEKANAN *MINI BLAST FURNACE*

Nama Mahasiswa : M. Hidayatullah Nur  
NRP : 2712 100 092  
Jurusan : Teknik Material dan Metalurgi  
Dosen Pembimbing : Dr. Sungging Pintowantoro, ST., MT.  
Dr.-Ing. Victor Yuardi Risonarta, ST., MSc.

## Abstrak

Studi pemodelan *mini blast furnace* (MBF) telah dilakukan dengan melakukan *scaledown* terhadap program yang digunakan untuk penelitian *blast furnace Institute of Multi-disciplinary Research for Advanced Material* dari Universitas Tohoku Jepang. Pemodelan dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari ukuran diameter kokas terhadap performa MBF. MBF yang digunakan dari *Anyang Steel* dengan kapasitas 300 m<sup>3</sup>. Modifikasi program dilakukan dengan mengubah jumlah *node* pada *mesh* geometri MBF. Hasil *scaledown* divalidasi dengan data operasi MBF dengan rata-rata persentase error 1,9%. Variasi diameter kokas digunakan antara lain 28 mm, 48 mm, 78 mm dan 118 mm. Temperatur maksimal MBF yang diperoleh berturut-turut 1990 °C; 2000 °C; 2030 °C; 2250 °C. *Pressure drop* yang diperoleh berturut-turut 0,93 atm; 0,75 atm; 0,63 atm; 0,54 atm. Semakin bertambah ukuran kokas produktifitas menurun, konsumsi kokas fluktuatif, efisiensi MBF semakin menurun, waktu *residence* dari udara menurun, kecepatan *blast* makin meningkat, tekanan udara depan tuyser semakin menurun, kecepatan *burden* semakin meningkat dan laju slag semakin meningkat. Dari hasil grafik produktifitas dan konsumsi kokas didapatkan *trenline* dengan perpaduan produktifitas tertinggi dan konsumsi kokas terendah pada ukuran diameter kokas 48 mm.

**Kata Kunci:** *Mini Blast Furnace*, diameter kokas, pemodelan smelter, ekstraksi bijih besi.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



# NUMERICAL ANALYSIS OF COKES SIZE EFFECT ON THE TEMPERATURE AND PRESSURE DISTRIBUTION OF MINI BLAST FURNACE

Name : M. Hidayatullah Nur  
NRP : 2712 100 092  
Department : Materials and Metallurgical Engineering  
Advisor : Dr. Sungging Pintowantoro, ST., MT.  
Dr.-Ing. Victor Yuardi Risonarta, ST., MSc.

## Abstract

*Modeling studies mini blast furnace (MBF) is done by scaledown of the program used for research at blast furnace Institute of Multi-disciplinary Research for Advanced Materials of Tohoku University - Japan. Modelling conducted to determine the effect of the size of the diameter of the coke on the performance of MBF. MBF use of Anyang Steel with a capacity of 300 m<sup>3</sup>. Modification program is done by changing the number of nodes in MBF mesh geometry. Scaledown results validated by MBF operating data with the average percentage error of 1.9%. Variations in coke diameter is 28 mm, 48 mm, 78 mm and 118 mm. Maximum temperature MBF obtained successively 1990°C; 2000°C; 2030°C; 2250°C. Pressure drop obtained successively 0.93 atm; 0.75 atm; 0.63 atm; 0.54 atm. Increasing the size of the coke causes decreased productivity, fluctuating coke consumption, MBF efficiency decreases, residence time of the air decreases, blast velocity increases, blast pressure in front tuyer decreases, speed of burden and rate of slag increases. From the results of productivity and coke consumption graph trenline obtained with a blend of the highest productivity and the lowest consumption of coke in coke size 48 mm diameter.*

**Keyword:** *Mini Blast Furnace, coke diameter, smelter modelling, Iron ore extraction.*

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL.....</b>	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN.....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRAK.....</b>	<b>vii</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>xvii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xix</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>5</b>
2.1 <i>Blast Furnace</i> .....	5
2.1.1 <i>Raceway</i> .....	6
2.1.2 <i>Cohesive Zone</i> (Area Kohesif) .....	7
2.1.3 <i>Deadman</i> .....	8
2.2 Kokas dalam <i>Blast Furnace</i> .....	9
2.2.1 Peran dan Fungsi Kokas dalam <i>Blast Furnace</i> .....	9
2.2.2 Properti Kokas.....	10
2.2.2.1 Komposisi Kokas.....	10
2.2.2.2 Sifat Mekanik, Fisik dan Kimiawi Kokas .....	11
2.3 Aliran Gas Reduktor dalam <i>Blast Furnace</i> .....	12
2.3.1 Distribusi Gas pada Lapisan <i>Ore</i> .....	13
2.3.2 Kontrol Aliran Gas .....	14
2.4 Profil Temperatur <i>Blast Furnace</i> .....	16
2.5 Perubahan Tekanan ( <i>Pressure Drop</i> ) pada <i>Blast Furnace</i> .....	18
2.6 Reaksi Kimia dan Transformasi Fase dalam <i>Blast Furnace</i> .....	19
2.7 Pemodelan <i>Blast Furnace</i> .....	22
2.7.1 Aliran Fase Gas .....	22

2.7.2 Aliran Fase Solid .....	22
2.7.3 Aliran Fase Cair .....	23
2.8 Analisis Numerik pada <i>Blast Furnace</i> berdasarkan Teori Multi-Fluid .....	23
2.8.1 Persamaan Momentum .....	24
2.8.2 Persamaan Perpindahan Panas .....	27
2.8.3 Persamaan Pergerakan Powder Statik .....	29
2.9 MBF <i>Anyang Steel</i> .....	31
2.10 Penelitian Sebelumnya .....	34
2.10.1 Pengaruh Diameter Kokas dan Konsentrasi Oksigen <i>Blast</i> pada Operasi Kupola .....	34
2.10.2 Analisa Numerik Performa <i>Blast Furnace</i> dengan Bahan Masukan Baru menggunakan Simulator Multi- Dimensi berbasis Teori Multi Fluida .....	35
2.10.3 Pengaruh Ukuran Kokas pada Pengoperasian Kupola .....	35
<b>BAB III METODOLOGI.....</b>	<b>37</b>
3.1 Diagram Alir Penelitian .....	37
3.2 Prosedur Pemodelan .....	38
3.2.1 Persiapan Data .....	38
3.2.2 Perhitungan <i>Mass Balance</i> untuk MBF .....	38
3.2.3 Pembuatan Model MBF .....	38
3.2.4 Validasi dengan Data Trial MBF .....	39
3.3 Software dan Bahasa Pemrograman .....	39
3.3.1 <i>Compaq Visual Fortran</i> .....	39
3.3.2 <i>Understand</i> .....	39
3.3.3 <i>Tecplot 2015</i> .....	40
3.4 Geometri MBF .....	40
3.5 Komposisi <i>Material</i> yang digunakan dalam Program .....	42
3.5.1 Bijih Besi .....	42
3.5.2 Kokas .....	42
3.5.3 PCI (Batubara) .....	43
3.5.4 Udara Panas ( <i>Hot Blast</i> ) .....	43
3.6 Laju Material Masuk dalam MBF .....	44
3.7 Material Properties .....	44

3.7.1 Sifat Fase Gas.....	45
3.7.2 Sifat Fase Solid.....	47
3.7.3 Sifat Logam Cair .....	49
3.7.4 Sifat Slag Cair .....	50
3.7.5 Sifat Powder .....	50
3.8 Persamaan Inputan pada Pemodelan .....	51
<b>BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>55</b>
4.1 Validasi Pemodelan MBF .....	55
4.1.1 Validasi Program BF65 Model dengan Data Distribusi Temperatur Penelitian Sungging, H. Nogami, J.I. Yagi .....	55
4.1.2 Validasi dengan Data Operasional dari MBF <i>Anyang Steel</i> .....	58
4.2 Data Fenomena Fisik MBF dengan Variabel Diameter Kokas.....	61
4.2.1 Perbandingan Distribusi Temperatur.....	62
4.2.2 Perbandingan Distribusi Tekanan .....	66
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>75</b>
5.1 Kesimpulan.....	75
5.2 Saran.....	76
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>77</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>81</b>
<b>UCAPAN TERIMA KASIH.....</b>	<b>105</b>
<b>BIODATA PENULIS .....</b>	<b>107</b>

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Hembusan udara panas pada daerah <i>raceway</i> (Nogami, 2006) .....	7
Gambar 2.2 Skematik <i>blast furnace</i> (Natsui, 2011) .....	8
Gambar 2.3 Hubungan <i>voidage</i> , diameter dan <i>pressure drop</i> (Geerdes, 2009) .....	13
Gambar 2.4 Skema distribusi aliran gas melewati lapisan kokas (Geerdes, 2009) .....	13
Gambar 2.5 Profil temperatur <i>blast furnace</i> (Kitaev, 1957) .....	16
Gambar 2.6 Proses reaksi reduksi dan daerah temperatur reduksi (Geerdes, 2009) .....	18
Gambar 3.1 Diagram alir metode penelitian pemodelan MBF dengan variasi diameter kokas .....	37
Gambar 3.2 Mesh geometri 2 dimensi MBF .....	41
Gambar 4.1 Perbandingan perhitungan dan pengukuran distribusi temperatur oleh Nogami dan Sungging [ $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ] (Sungging, 2005) .....	57
Gambar 4.2 Perbedaan grid setelah modifikasi program [ $\text{m}$ ] .....	59
Gambar 4.3 Pengaruh diameter kokas terhadap distribusi temperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ] .....	62
Gambar 4.4 Grafik pengaruh diameter kokas terhadap produktifitas dan konsumsi kokas .....	64
Gambar 4.5 <i>Trenline</i> pengaruh diameter kokas terhadap produktifitas dan konsumsi kokas .....	65
Gambar 4.6 Pengaruh diameter kokas terhadap distribusi perbedaan tekanan [ $\text{atm}$ ] .....	66
Gambar 4.7 Grafik pengaruh diameter kokas terhadap efisiensi dan laju gas CO keluar .....	68
Gambar 4.8 Pengaruh diameter kokas terhadap distribusi gas CO [%] .....	69
Gambar 4.9 Grafik pengaruh ukuran kokas terhadap tekanan tuyer dan kecepatan <i>blast</i> .....	70
Gambar 4.10 Grafik pengaruh ukuran kokas terhadap kecepatan <i>burden</i> dan laju slag .....	71

Gambar 4.11 Pengaruh diameter kokas terhadap distribusi gas CO<sub>2</sub>  
[%]..... 73



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Data properti kokas yang dibutuhkan untuk <i>blast furnace</i> (Babich, 2008).....	12
Tabel 2.2 Reaksi pada proses peleburan bijih besi di <i>blast furnace</i> .....	20
Tabel 2.3 Reaksi transformasi fasa pada proses peleburan di <i>blast furnace</i> .....	21
Tabel 2.4 Data dimensi MBF 300 m <sup>3</sup> <i>Anyang Steel</i> (Pandey, 2001) .....	31
Tabel 2.5 Data operasi MBF <i>Anyang Steel</i> (Pandey, 2001) .....	32
Tabel 2.6 <i>Material balance</i> dari <i>Anyang Steel</i> MBF (Pandey, 2001) .....	33
Tabel 2.7 Data komposisi material yang digunakan pada berbagai <i>blast furnace</i> di Cina (Pandey, 2001).....	34
Tabel 3.1 Komposisi bijih besi (Pandey, 2001).....	42
Tabel 3.2 Komposisi kokas yang digunakan MBF (Pandey, 2001) .....	43
Tabel 3.3 Komposisi PCI (batubara) (Sungging, 2005) .....	43
Tabel 3.4 Komposisi <i>hot blast</i> (Pandey, 2001) .....	44
Tabel 3.5 Laju material masuk (Pandey, 2001).....	44
Tabel 3.6 Fase dan spesies kimia (Sungging, 2005).....	45
Tabel 3.7 Koefisien untuk persamaan <i>heat capacity</i> fase gas (Sungging, 2005).....	47
Tabel 3.8 Panas pembentukan [kcal/kmol] (Sungging, 2005).....	47
Tabel 3.9 Koefisien untuk persamaan <i>heat capacity</i> fase solid dan powder (Castro, 2000).....	48
Tabel 3.10 Panas pembentukan [kcal/kmol] (Castro, 2000).....	49
Tabel 3.11 Parameter powder pada pemodelan (Nogami, 2006).51	
Tabel 3.12 Berat molekuler [kg/kmol] (Nogami, 2006).....	51
Tabel 3.13 Persamaan momentum tiap fase (Castro, 2000).....	52
Tabel 3.14 Persamaan energi setiap fase (Castro, 2000) .....	52
Tabel 3.15 Persamaan fraksi massa dari setiap spesies kimia (Castro, 2000).....	53
Tabel 3.16 Berat molekuler [kg/kmol] (Castro, 2000) .....	54

Tabel 4.1 Parameter operasi *blast furnace* 4550 m<sup>3</sup>  
(Sungging,.2005)..... 56

Tabel 4.2 Parameter operasi MBF *Anyang Steel* (Pandey, 2001)60

Tabel 4.3 Perbandingan perhitungan dan pengukuran MBF *Anyang Steel* .....61

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Dalam menyongsong UU Minerba No.4 tahun 2009 tentang peningkatan nilai tambah mineral dan batu bara melalui kegiatan pengolahan dan pemurnian mineral dan batu bara maka diperlukan penguasaan riset di bidang teknologi pengolahan material. ITS sebagai salah satu perguruan tinggi negeri yang merupakan institusi teknik telah mengembangkan berbagai teknologi pengolahan mineral, salah satunya yaitu teknologi *mini blast furnace* yang merupakan salah satu proses pirometalurgi atau proses pengolahan mineral dengan menggunakan energi panas.

Besi dalam sejarah bangsa-bangsa yang maju merupakan awal pembangunan negara. Indonesia saat ini memiliki PT Krakatau Steel sebagai industri besi baja nasional. Di Indonesia sendiri semua bahan baku yang dibutuhkan untuk pembuatan besi baja dengan menggunakan teknologi *blast furnace* tersedia. Untuk mengurangi biaya pembuatan besi baja dapat digunakan bahan baku lokal dengan berbagai pengolahan awal agar dapat digunakan pada *blast furnace* yang saat ini sedang dikembangkan (Pardiarto, 2011).

*Mini blast furnace* (MBF) adalah teknologi dikembangkan berdasarkan *blast furnace* namun dengan skala yang lebih kecil. Teknologi ini dikembangkan dimaksudkan untuk mendukung industri hulu baja lokal dengan kapasitas produksi tingkat menengah sehingga biaya pembuatannya lebih kecil. Salah satu teknologi MBF dikembangkan oleh *Anyang Steel* dengan kapasitas *working volume* sebesar 300 m<sup>3</sup> (Pandey, 2001).

Pengembangan MBF dapat dilakukan dengan menggunakan reaktor MBF baik secara *trial error* maupun dengan menggunakan metode numerik pemodelan untuk mendapatkan pendekatan secara matematika sehingga parameter pemilihan variabel dalam percobaan *trial error* dapat dipersempit sehingga lebih efektif.



## BAB I PENDAHULUAN

---

Selain itu pendekatan numerik dilakukan untuk memahami proses yang terjadi di dalam MBF.

Salah satu faktor yang berpengaruh terhadap performa MBF adalah keberadaan *voidage* yang besar dalam melewati gas-gas reduktor yang dihasilkan dari kokas ke atas dan juga melewati cairan logam maupun *slag* dari area *stack* ke bagian *hearth*. *Voidage* ini dipengaruhi oleh besar kecilnya ukuran kokas. Sehingga hal yang patut untuk diperhatikan adalah rasio ukuran kokas dengan *burden material* yang lainnya. Jika ukuran kokas terlalu besar maka akan mengakibatkan terjadinya *pencampuran burden material terutama ore* ke dalam rongga yang terlalu besar untuk ukuran *ore* tersebut. Bercampurnya material ini akan mengakibatkan proses reduksi berjalan tidak normal sehingga perlu diketahui ukuran yang kokas untuk mengoptimalkan proses yang terjadi di dalam MBF. Selain itu akan terjadi *loss* dari gas-gas reduktor sehingga gas buang akan semakin banyak menghasilkan polusi udara yang mana dalam pengembangan *mini blast furnace* menjadi hambatan tersendiri dikarenakan dalam sejarahnya pengembangan dari *mini blast furnace* ke *blast furnace* dengan ukuran besar dimaksudkan untuk meminimalkan gas polutan. Hal ini juga tentunya semakin memperkecil efisiensi dari MBF. Namun jika ukuran kokas terlalu kecil maka gas reduktor tidak akan bisa mengalir ke atas sehingga menyebabkan proses tidak bisa berjalan dan bisa menyebabkan tekanan udara di internal MBF membesar dan menyebabkan ledakan. Tentunya untuk mendapatkan data ukuran kokas yang optimal dalam proses MBF membutuhkan biaya yang besar jika dilakukan dengan metode *trial and error*. Namun dengan pendekatan matematis berupa pemodelan dapat diestimasi dengan baik ukuran kokas yang optimal untuk proses pengolahan bijih besi dengan MBF.

Pada penelitian sebelumnya telah dikembangkan simulator *blast furnace* yang mampu memprediksikan proses yang terjadi baik berdasarkan konsep *heat, mass* dan *momentum transfer*, termodinamika, dan fenomena transport (Nogami, 2006). Penelitian tersebut khusus untuk pengolahan bijih besi menjadi pig



iron. Sehingga dalam langkah awal penelitian kali ini akan membuat sebuah program pemodelan MBF milik *Anyang Steel* berdasarkan simulator milik *Institute of Multi-disciplinary Research for Advanced Material* di *Tohoku University* dengan melakukan *scaledown* terhadap *working volume blast furnace*. Program tersebut memiliki kode yaitu *BF65 Model* yang merupakan hasil komputerisasi persamaan konservasi massa, energi, momentum dan panas yang disusun dalam bahasa pemrograman fortran. Dari program ini parameter pemodelan yang digunakan adalah variasi diameter kokas dalam simulator MBF untuk pengolahan bijih besi.

Dengan mengaplikasikan program simulasi *Institute of Multi-disciplinary Research for Advanced Material* pada MBF *Anyang Steel*, dan memvariasikan ukuran kokas diharapkan akan mampu memberikan informasi empirik mengenai pengaruh ukuran kokas terhadap performa MBF khususnya distribusi temperatur dan tekanan.

### 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan penjelasan pada latar belakang di atas, maka rumusan masalah dalam tugas akhir ini yaitu:

1. Bagaimana pengaruh variasi ukuran diameter rata-rata kokas terhadap distribusi temperatur MBF *Anyang Steel*.
2. Bagaimana pengaruh variasi ukuran diameter rata-rata kokas terhadap distribusi tekanan MBF *Anyang Steel*.
3. Berapa diameter rata-rata kokas yang tepat untuk mengoptimalkan proses MBF *Anyang Steel*.

### 1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian ini memiliki beberapa batasan masalah yaitu:

1. Material bahan baku dianggap homogen secara sifat, komposisi, dan ukuran.
2. Desain reaktor MBF yang digunakan dalam pemodelan dianggap sudah baik dari aspek struktur.
3. Pemodelan dilakukan dalam keadaan *steady state* 2 dimensi.



## BAB I PENDAHULUAN

---

4. Perhitungan disintegrasi temperatur rendah kokas tidak dimasukkan dalam program pemodelan.
5. Perhitungan Fe yang terlarut dalam slag tidak dimasukkan dalam program pemodelan.
6. Perhitungan zat-zat pengotor tidak dimasukkan dalam program pemodelan.

### 1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini memiliki tujuan yaitu:

1. Mengetahui pengaruh variasi ukuran kokas terhadap distribusi temperatur MBF *Anyang Steel*.
2. Mengetahui pengaruh variasi ukuran kokas terhadap distribusi tekanan MBF *Anyang Steel*.
3. Menentukan ukuran diameter rata-rata kokas sehingga didapatkan proses MBF *Anyang Steel* yang optimal.

### 1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini memiliki manfaat untuk memberikan informasi empirik dan parameter proses yang optimal untuk mengolah ore/bijih besi nasional menjadi besi spon khususnya pada ukuran kokas dengan menggunakan pemodelan MBF serta dapat digunakan untuk acuan kerja para operator di industri pengolahan besi dan baja.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 *Blast Furnace*

*Blast furnace* adalah suatu reaktor ekstraksi bijih besi berdimensi diameter 12 m dan tinggi 30 m dengan prinsip kerja *conter current flow*, tinggi total *blast furnace* akan naik jika telah terpasang peralatan charging material pada bagian atas *blast furnace*. Secara struktur pada umumnya *blast furnace* dibangun dengan menggunakan baja silinder yang dibagi dalam beberapa segmen dimana baja silinder ini berfungsi sebagai penopang dan penutup. Pada bagian dalam baja silinder akan dilapisi dengan batu tahan api (refraktori). Struktur *blast furnace* berbentuk silinder memanjang dengan bagian atas dan bagian bawah dibuat meruncing/konus. Pada puncak dari *blast furnace* terdapat *hopper* dan pembuangan gas setinggi 3 m. Sistem pemasukan material umpan termasuk kokas dan bijih besi/ore terdapat pada bagian atas *blast furnace* melalui *hopper* yang mengatur distribusi material umpan terdistribusi merata, selanjutnya material umpan akan mengalami pemanasan awal pada area *preheat* dan mengalami melting pada area *melting* serta mengalami superheat dan tereduksi pada area reduksi. Tahap akhir dari proses *blast furnace* adalah pengeluaran logam cair dan *slag* yang dikeluarkan melalui lubang yang terpisah untuk logam cair dan slag. Kedua lubang keluaran ini terpisah dengan prinsip kerja memanfaatkan berat jenis dari logam cair dan *slag*. Pada bagian bawah *blast furnace* atau disebut *bosh* dilengkapi dengan beberapa lubang pembuka atau tuyser. Tuyser memiliki fungsi sebagai pensuplai udara yang akan membuat tiupan aliran udara panas. Pada bagian bawah dekat dengan dasar *bosh* terdapat *tapping hole* atau lubang yang berfungsi sebagai tempat mengalirnya logam cair hasil proses dari *blast furnace*. Tuyser terletak diatas *tapping hole* dengan bentuk tuyser pada umumnya melingkar mengelilingi *blast furnace*. Struktur tuyser biasanya terdiri dari sabuk pipa silinder yang





## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

---

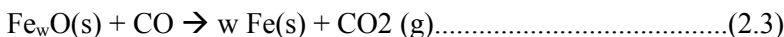
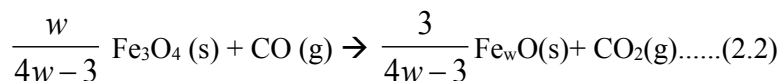
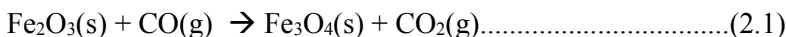
diletakkan pada bagian luar *blast furnace* dan diberikan pipa pengalir masuk ke bagian dalam *blast furnace* dengan pipa pengalir berdiameter lebih kecil dibanding dengan pipa sabuk. Desain dari tuyer ini memberikan andil pada tingkat keberhasilan proses dalam *blast furnace*. Pada bagian ini terdapat lubang untuk mengalirkan slag. Lubang ini biasanya terletak pada area dibawah tuyere dan diatas *tapping hole* (Rahmat, 2016).

Bagian dalam *blast furnace* terbagi atas tiga struktur fisik (Austin, 2006) yaitu:

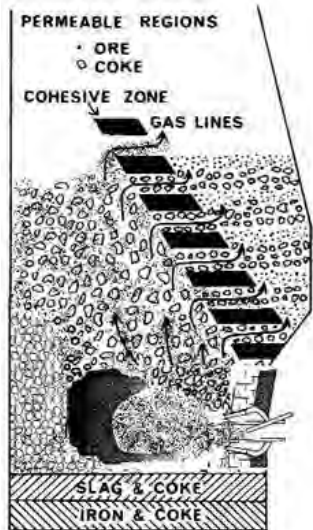
### 2.1.1 *Raceway*

*Raceway* adalah area dimana banyak terdapat kekosongan atau *void* dikarenakan terdapat hembusan fluida / udara bertekanan dan berkecepatan tinggi dari tuyer. Karena hembusan udara ini maka energi panas atau termal terbentuk dan pada area ini temperatur tertinggi *blast furnace* berada pada area ini. Energi panas yang terbentuk akan memanaskan kokas dan terjadi reaksi sehingga terbentuk karbon monoksida dan karbon dioksida.

Karbon monoksida merupakan gas reduktan yang dapat mereduksi oksida besi secara tak langsung. Keboleh jadian reduksi oksida besi secara tak langsung terjadi dalam bentuk tiga tahapan reaksi kimia dalam persamaan 2.1 - 2.3 (Castro, 2005).



Panas dari reaksi di area *raceway* juga membentuk gas panas, dimana gas ini akan bergerak ke atas menjadi pemanas awal material umpan saat masuk pada bagian atas *blast furnace*. Skematik bentuk *raceway* pada *blast furnace* terdapat pada ilustrasi Gambar 2.5.



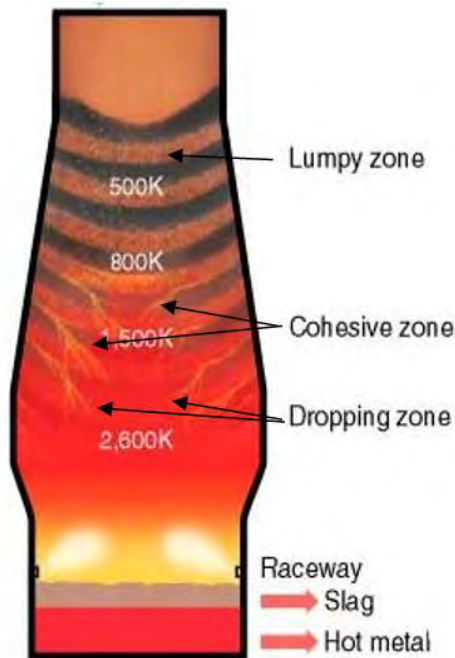
Gambar 2.1 Hembusan udara panas pada daerah *raceway*  
(Nogami, 2006)

### 2.1.2 *Cohesive Zone* (Area Kohesif)

Pada area kohesif ini material umpan (ore, sinter atau pellet) meleleh dan mencair. Proses pencairan material umpan ini menjadi batas kondisi untuk menentukan laju pencairan dan laju produksi dari proses di *blast furnace*. Pada saat terjadi fenomena pencairan dari material padat ke cair material akan mengalami penurunan sifat permabilitasnya (Sungging, 2005). Faktor ini yang harus diperhatikan sehingga suplai udara yang dihembuskan melalui tuyser tetap menjaga kecepatan aliran dalam *blast furnace* stabil. Pada area ini material solid berada pada temperatur 1200 – 1400 °C. Area kohesif dapat mempresentasikan beberapa perbedaan bentuk bergantung dengan kondisi proses.



## BAB II TINJAUAN PUSTAKA



Gambar 2.2 Skematik *blast furnace* (Natsui, 2011)

### 2.1.3 *Deadman*

Pada area ini terdapat pergerakan yang sangat lambat dari fase solid atau dapat diartikan area statik. *Deadman* berbentuk konikal terletak pada bagian tengah *bosh*, pada area *deadman* kokas diam dalam jangka waktu yang lama-harian (Castro, 2006). Pada umumnya pada daerah *deadman* ukuran kokas lebih kecil dibanding dengan rata rata ukuran kokas pada *blast furnace* yang dapat mengakibatkan reaksi dilusi dari karbon, reduksi secara langsung oksida besi dan transfer silika. Reaksi reduksi langsung pada proses pengolahan bijih besi melibatkan karbon dari kokas dan merupakan reduktan yang kuat. Reaksi reduksi ini merupakan reaksi endotermik yang sangat kuat sehingga membutuhkan

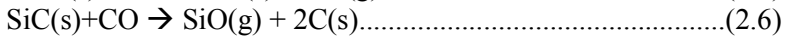
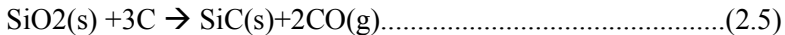


## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

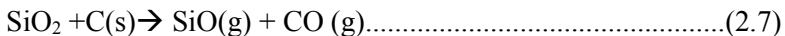
temperatur yang tinggi. Reaksi kimia reduksi oksida besi secara langsung oleh karbon dapat dilihat pada persamaan 2.4



Selain reaksi reduksi secara langsung oksida besi oleh reduktan karbon, pada area ini juga terjadi transfer silika. Transfer silika juga merupakan proses yang sangat penting setelah proses reduksi oksida besi. Pada transfer silika, silika akan menjadi silika dalam bentuk gas dan abu. Secara partial silika akan tereduksi menjadi SiC atau Gas SiO. Proses pembentukan SiC dan gas SiO sesuai dengan persamaan 2.5 dan 2.6



Gas SiO akan kembali teroksidasi saat pendinginan atau tereduksi saat mengalami kontak dengan logam cair (Sungging, 2005). Reaksi terjadi saat pembentukan logam dan slag pada persamaan 2.7 dan 2.8



### 2.2 Kokas dalam *Blast Furnace*

#### 2.2.1 Peran dan Fungsi Kokas dalam *Blast Furnace*

Kokas memenuhi tiga fungsi utama dalam *blast furnace* antara lain menghasilkan panas, sebagai agen pereduksi dan sebagai pendukung struktur material. Lebih lanjut kokas berperan sebagai penyedia zat karbon dalam proses karbonisasi.

Panas dihasilkan dari gasifikasi kokas di depan tuyer (atau biasa disebut *raceway*) dan terutama dibawa oleh gas panas yang disemburkan. Panas yang dihasilkan dari pembakaran kokas 80% digunakan dari keseluruhan kebutuhan panas *blast furnace*. Panas



## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

---

dibutuhkan untuk reaksi endotermik, pemanasan awal dan peleburan masukan pemanasan produk cair.

Karbon dan oksigen bereaksi membentuk karbon monoksida secara langsung ( $2C + O_2 = 2CO$ ) atau pada temperatur tinggi melalui reaksi *Boudouard* ( $C + O_2 = CO_2$  dan kemudian reaksi *solution loss*  $CO_2 + C = 2CO$ ). Karbon monoksida (juga gas hidrogen) berfungsi sebagai media pereduksi. Sebagai media pereduksi karbon monoksida sangat dibutuhkan karena kebutuhan konsumsi panasnya lebih sedikit jika dibandingkan reaksi langsung kokas dengan *ore* yang membutuhkan panas lebih banyak karena reaksi endotermik.

Kokas juga membentuk permeabilitas gas dalam *blast furnace*. Dengan dibentuknya layer antara kokas dan *ore* dan kokas sentral maka akan terbentuk aliran gas yang teratur dan mengenai semua *ore*. Hal ini dikarenakan ukuran kokas memiliki diameter yang lebih besar dibanding *ore* sehingga *voidage* (rongga antara kokas) akan lebih besar sehingga gas lebih banyak mengalir ke daerah *voidage* besar tersebut. Hal ini juga membantu dalam pembentukan gas CO yang lebih efektif. Adanya *voidage* ini juga berfungsi untuk aliran likuid slag dan besi cair ke bagian *hearth*.

Pada *blast furnace* penting untuk mengefisiensi penggunaan bahan bakar salah satunya dengan membuat temperatur lebur dari besi cair lebih rendah dari besi cair murni. Berdasarkan diagram Fe-Fe<sub>3</sub>C temperatur terendah likuid cair pada komposisi besicair dengan 4,3 % karbon. Sehingga dengan penggunaan kokas akan menyediakan zat paduan karbon dalam besi cair. Keuntungannya adalah penggunaan refraktori *blast furnace* lebih lama dan kebutuhan panas lebih sedikit (Babich, 2008).

### 2.2.2 Properti Kokas

#### 2.2.2.1 Komposisi Kokas

Zat organik dalam kokas mengandung 96,5 – 97,5 % C; 0,5 – 0,8 % H<sub>2</sub> ; 0,3 – 0,4 % O<sub>2</sub> dan sejumlah kecil sulfur, nitrogen natrium, kalium dan elemen lainnya. Pada komposisi tersebut karbon sangat penting karena digunakan sebagai agen pereduksi



selain daripada hidrogen sehingga *fixed carbon* dalam kokas ketika proses pembuatan kokas harus setinggi mungkin. Abu melebur dan masuk ke dalam slag, yang mana membutuhkan panas untuk pembentukan slag dan pemanasannya. Hal ini meningkatkan konsumsi kokas per ton hot metal dengan 1,5 – 2,5% setiap penambahan 1 % zat abu dalam kokas. Kandungan abu dalam kokas sebaiknya tidak melebihi 10-15%.

### **2.2.2.2 Sifat Mekanik, Fisik dan Kimiawi Kokas**

#### **2.2.2.2.1 Reaktifitas**

Reaktifitas kokas menyatakan kecepatan pembentukan gas monoksida menurut reaksi *solution loss*. Pada penelitian yang dilakukan oleh Nippon Steel didapatkan data *Coke Reactivity Index* (CRI). Jika pada penambahan PCI atau injeksi bahan bakar yang lainnya nilai CRI akan rendah.

#### **2.2.2.2.2 Kombustibilitas**

Kombustibilitas diartikan sebagai kecepatan reaksi dengan oksigen membentuk gas karbon dioksida atau reaksi pembakaran kokas. Salah satu karakteristik kombustibilitas ini adalah temperatur terjadinya pengapian. Kokas mulai terbakar otomatis pada temperatur 650 – 700 °C sedangkan arang pada temperatur 250 °C. Temperatur pembakaran yang dihasilkan bisa mencapai 2400 °C. Pada kondisi operasi *blast furnace* nilai temperatur ini tergolong rendah dikarenakan adanya reaksi *solution loss* yang merupakan reaksi endotermik.

#### **2.2.2.2.3 Ukuran**

Ukuran kokas sebaiknya tidak kurang dari 40 mm (40-60 atau 40-80 mm). Diameter kokas sebaiknya lebih besar dengan penambahan diameter *blast furnace*. Kokas dengan rentang ukuran kecil digunakan untuk mendapatkan distribusi gas yang optimal. Dikarenakan ukuran kokas semakin mengecil ketika menurun pada *blast furnace* berdasarkan adanya kerusakan mekanik, gasifikasi, erosi dan sebagainya kekuatan kokas merupakan sesuatu yang penting. Kokas pada kondisi ruang normal (STP) memiliki kekuatan berbeda dengan kondisi di *blast furnace*. Pada kondisi



## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

*blast furnace* kekuatan kokas dikodekan dengan CSR index(*coke strength after reaction*) (Babich, 2008).

Data properti kokas yang dibutuhkan dalam *blast furnace* dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Data properti kokas yang dibutuhkan untuk *blast furnace* (Babich, 2008)

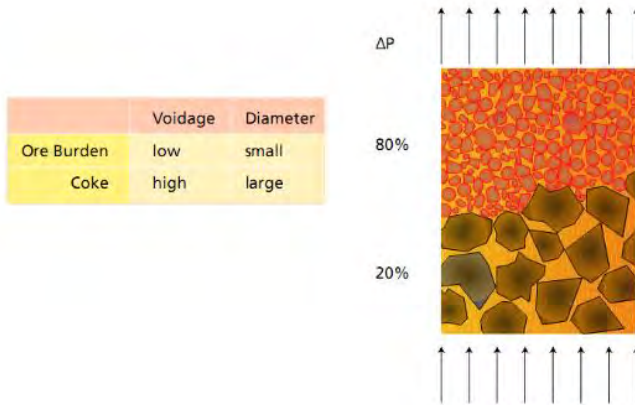
Properti Kimiawi	Unit	Nilai
Abu	% berat	< 9
Sulfur	% berat	< 0,7
Fosfor	% berat	<0,025
Alkali	% berat	<0,2
Moistur	% berat	< 5
Properti Fisik	Unit	Nilai
CSR	% > 10 mm	> 65
CRI	%	< 23
I <sub>40</sub>	% > 40 mm	>57
I <sub>10</sub>	% < 10 mm	< 18
Fraksi Ukuran	Unit	Nilai
>100 mm	%	0
>80 mm	%	<10
<40 mm	%	<18
<10 mm	%	<3

### 2.3 Aliran Gas Reduktor dalam *Blast Furnace*

Terdapat perbedaan antara lapisan bijih besi dan lapisan kokas. Perbedaan ini terjadi akibat adanya perbedaan ukuran diameter bijih besi dan kokas. Pada Gambar 2.3 terlihat bahwa lapisan bijih besi memiliki hambatan terhadap aliran gas yang lebih tinggi dibandingkan dengan hambatan pada lapisan kokas. Profil hambatan gas atau biasa disebut dengan *pressure drop* menunjukkan bagaimana gas mengalir di dalam *blast furnace* (Geerdes, 2009).



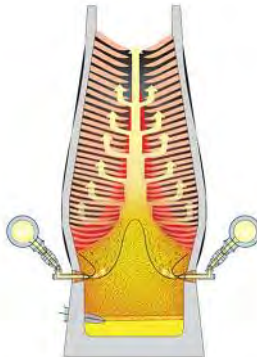
## BAB II TINJAUAN PUSTAKA



Gambar 2.3 Hubungan *voidage*, diameter dan *pressure drop* (Geerdes, 2009)

### 2.3.1 Distribusi Gas pada Lapisan Ore

Gas yang disemburkan dari tuyer didistribusikan melalui lapisan kokas kemudian melewati daerah kohesif selanjutnya melewati daerah kokas granular dengan lapisan bijih besi di atasnya seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4



Gambar 2.4 Skema distribusi aliran gas melewati lapisan kokas (Geerdes, 2009)





## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

---

Pada daerah lapisan bijih besi diaproksimasikan sekitar 80% terjadi hambatan terhadap aliran gas reduktor. Proses reduksi mulai terjadi di daerah lapisan bijih besi dan kokas tersebut. Faktor yang paling penting untuk menentukan permeabilitas untuk aliran gas adalah voidage antara partikel. *Voidage* yang ditimbulkan antara partikel sangat bergantung pada rasio partikel kasar dengan partikel kecil. Semakin lebar distribusi ukuran, semakin rendah *voidage* tersebut. Selain itu, semakin halus material, semakin rendah permeabilitas. Dalam operasi praktis permeabilitas bahan beban bijih ditentukan oleh jumlah partikel halus (persentase dibawah 5 mm) (Geerdes, 2009).

### 2.3.2 Kontrol Aliran Gas

Aliran gas optimal dalam tungku modern yang dioperasikan dengan produktifitas tinggi dan kecepatan input kokas yang rendah memiliki daerah zona kohesif berbentuk V terbalik. Tetapi, gas reduktor yang melalui pusat *furnace* (daerah pusat dimana tidak terdapat bijih besi) tidak dimanfaatkan dengan optimal. Kehilangan gas "tidak terpakai" ini harus diminimalkan. Jika aliran gas sentral terlalu tinggi, aliran gas di sepanjang dinding terlalu kecil untuk pemanasan, reduksi dan peleburan bijih besi dan akibatnya bagian bawah zona kohesif semakin mendekati tuyser. Dalam kondisi ini kecepatan pemakaian reduktor akan meningkat dan kemungkinan besar terjadi kerusakan tuyser. Sangat penting aliran gas pusat mendistribusikan aliran gas sendiri melalui celah kokas ke lapisan bijih besi. Oleh karena itu, permeabilitas bagian kokas sentral tidak boleh terlalu tinggi, yang berarti bahwa diameter kolom kokas pusat tidak harus terlalu lebar. Di lain sisi, jika aliran gas sentral tersebut (sebagian) ditahan, bagian gas yang relatif besar lewat sepanjang dinding *furnace* dan didinginkan rendah dalam tungku. Reaksi reduksi melambat. Dalam situasi ini aliran gas sentral kecil dan terjadi kerugian panas yang tinggi. Pengalaman menunjukkan bahwa aliran gas di dinding *furnace* dan aliran gas sentral *furnace* sangat berkorelasi. Pengontrolan aliran gas didasarkan pada keseimbangan antara aliran gas pusat dan dinding dengan optimal.



## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

---

Kesulitan dengan kontrol aliran gas adalah aliran gas dipengaruhi oleh banyak perubahan dalam komponen material, parameter proses dan instalasi spesifik. Variasi dalam persentase partikel halus pada dinding (tidak semua) dan sifat kerusakan temperatur rendah dari material yang sangat penting (Geerdes, 2009).

Aliran gas harus benar-benar dipantau untuk mengontrolnya. Parameter yang paling penting untuk mendefinisikan aliran gas adalah:

1. Penurunan material (stok rods, pressure taps) dan perbedaan tekanan dari material.
2. Kehilangan panas atau perubahan temperatur di dinding *furnace*.
3. Komposisi gas pada stockline dan profil temperatur.

Pengontrolan aliran gas dan pengoptimalan distribusi beban diketahui secara trial and error, dan telah dikembangkan untuk setiap jenis *furnace* yang berbeda secara individual. Beberapa komentar umum dapat dibuat:

1. Aliran gas terutama dikendalikan dengan rasio diameter kokas dengan bijih besi.
2. Pusat *furnace* harus permeabel dan tidak ada atau minimalisir beban bijih (ukuran besar) dipusat *furnace*.
3. Persentase kokas di dinding *furnace* tidak boleh terlalu rendah. Perhatikan bahwa tebal vertikal 70 cm bijih besi di daerah *throat* mengkonsumsi sekitar 25 cm tebal vertikal kokas untuk reduksi langsung. Sebuah kolom vertikal terus menerus dari material bijih besi harus dicegah. Celah dengan kokas harus dipertahankan antara semua lapisan bijih.
4. Konsentrasi partikel halus di dekat dinding harus dicegah.
5. Aliran gas sentral diatur oleh jumlah beban bijih mencapai pusat. Jumlah bijih mencapai pusat sangat bergantung pada ketebalan lapisan bijih dan jumlah benjolan kokas kasar. Untuk mencapai gas stabil aliran gas sentral harus disimpan sekonsisten mungkin dan akibatnya, ketika perubahan bijih untuk rasio kokas yang diperlukan, lapisan bijih harus dijaga

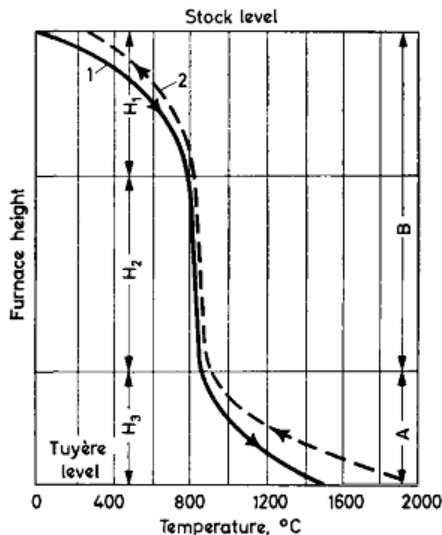


## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

konstan. Hal ini sangat penting ketika mengubah tingkat injeksi batubara karena hal ini akan mengakibatkan perubahan besar dalam ketebalan lapisan relatif bijih dan kokas yang dibuat.

6. Ketebalan lapisan kokas di *throat* biasanya di kisaran 40 sampai 60 mm. Dalam contoh kita di bagian 2.3 itu adalah 46 cm. Diameter perut adalah 1,4-1,5 kali lebih besar dari diameter *throat*. Oleh karena itu, permukaan lebih dari ganda selama keturunan beban dan ketebalan lapisan dikurangi menjadi kurang dari setengah ketebalan lapisan pada *throat*. Aturan jepang praktis menunjukkan bahwa ketebalan lapisan pada perut tidak boleh kurang dari 18 cm. Para penulis telah, bagaimanapun, berhasil bekerja dengan ketebalan lapisan kokas di perut 14 cm.

### 2.4 Profil Temperatur *Blast Furnace*



Gambar 2.5 Profil temperatur *blast furnace* (Kitaev, 1957)



## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

---

Skema pertukaran panas menurut B.I Kitaev (Kitaev, 1957): *A-direct reduction; B-indirect reduction; H1-upper stage of heat exchange; H3 – blower stage of heat exchange; H2 – height not employed in heat exchange; 1 – burden temperatur; 2 – gas temperatur.*

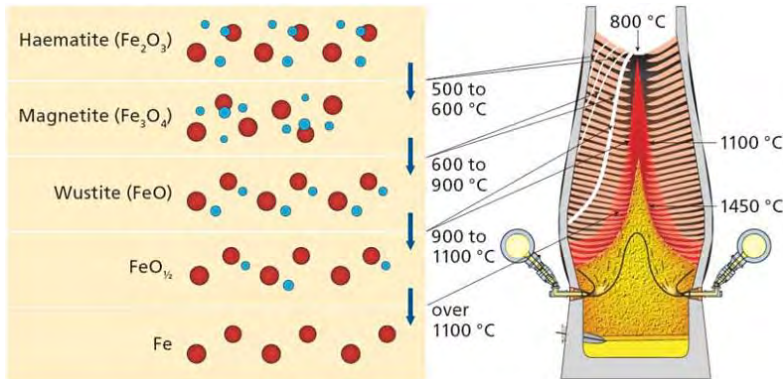
Dari Gambar 2.5 diketahui:

1. Perpindahan dari gas *blast furnace* diselesaikan dengan 2 langkah, dipisahkan dengan zona reserve dengan variasi ketinggian
2. Temperatur operasi pada setiap tahap terjadi independen, kecuali temperatur pada tahap atas tergantung pada temperatur gas ketika melewati bagian bawah
3. Perpindahan panas pada *blast furnace* secara lengkap dilihat pada reserve zone

Profil temperatur dan reaksi kimia di *blast furnace* berkaitan erat. Pada Gambar 2.6 proses reduksi dari oksida menjadi wustit terjadi pada rentang temperatur 900-1100 °C, wustit tersebut dapat tereduksi secara tidak langsung tanpa melalui reaksi boudouard. Daerah reaksi kimia ini terjadi pada 50 sampai 60% dari tinggi *furnace* dan mempunyai temperatur relatif konstan. Daerah ini dinamakan dengan daerah penyerapan temperatur (*High Thermal Reserve Zone / HTRZ*) (Geerdes, 2009).



## BAB II TINJAUAN PUSTAKA



Gambar 2.6 Proses reaksi reduksi dan daerah temperatur reduksi (Geerdes, 2009)

### 2.5 Perubahan Tekanan (*Pressure Drop*) pada *Blast Furnace*

Konsep dasar aliran gas melewati lapisan material adalah hambatan terhadap aliran (penurunan tekanan melewati ketinggian susunan *blast furnace*). Tujuan utama blast furnace untuk mendapatkan proses dengan permeabilitas gas yang sama dan tanpa hambatan besar sehingga *pressure drop* dihasilkan sekecil mungkin.

Jika laju aliran gas kecil (aliran laminar), pada awalnya terjadi *pressure drop* yang relatif kecil. Pada daerah laminar ini, kehilangan tekanan berbanding lurus dengan kecepatan dan disebabkan kehilangan energi kekentalan dari gas. Dengan meningkatnya kecepatan dan memasuki wilayah turbulensi, kehilangan tekanan meningkat. Kehilangan tekanan ini berhubungan dengan kehilangan energi kinetik. Jika pada pipa kosong diisi dengan partikel sferikal padat dengan diameter yang sama, aliran gas akan terblokir oleh masukan dan gas akan mengalir hanya melalui ruang kosong antara partikel padat. (Biswas, 1982) menyusun persamaan untuk perhitungan *pressure drop* sesuai persamaan 2.9.

$$\frac{\Delta P}{H} = \psi \cdot \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3 \cdot d} \cdot \rho_o \cdot W_o^2 \cdot \frac{T}{T_o} \cdot \frac{P_o}{P} \dots \dots \dots (2.9)$$



Persamaan 2.9 menunjukkan bahwa *pressure drop* atau tahanan terhadap aliran gas menurun dengan:

- a. Peningkatan *voidage*
- b. Peningkatan tekanan pada tekanan kolom
- c. Peningkatan ukuran diameter partikel
- d. Penurunan massa jenis gas
- e. Penurunan kecepatan gas (Biswas, 1982)

### 2.6 Reaksi Kimia dan Transformasi Fase dalam *Blast Furnace*

Sembilan belas reaksi kimia dan sembilan transformasi fasa terjadi pada proses dalam *blast furnace*. Oksida besi dalam bijih besi teroksidasi secara tidak langsung oleh karbon monoksida dan gas hidrogen, sedangkan reduksi secara langsung oleh karbon. Pembakaran dan gasifikasi karbon oleh oksigen yang terdapat pada daerah raceway menghasilkan gas karbon monoksida dan gas karbon dioksida. Proses pembakaran dan gasifikasi karbon ini terjadi pada saat karbon pada fase solid dan powder (kokas). Karbon digunakan dalam reaksi pembentukan gas hidrogen dan *solution loss* dengan temperatur reaksi berkisar 900 °C (Nogami, 2006).

Reaksi antara gas hidrogen dan gas karbon dioksida menghasilkan produk berupa gas karbon dioksida dan uap air. Reaksi ini adalah reaksi reversible untuk menjaga spesies karbon dan gas hidrogen (Iwanaga, 1991). *Volatile* muncul pada saat kokas pada bentuk *powder* yang homogen bereaksi dengan gas oksigen dan gas karbon dioksida. Reaksi ini terjadi pada daerah pembakaran dan berlangsung dengan sangat cepat.

Rangkuman reaksi kimia dan transformasi fasa yang terjadi selama proses peleburan di *blast furnace* seperti tergambar dalam Tabel 2.2 dan Tabel 2.3 (Rahmat, 2016)



## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Tabel 2.2 Reaksi pada proses peleburan bijih besi di *blast furnace*

No	Reaksi Kimia	Keterangan
1.	$3\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{s}) + \text{CO}(\text{g}) \rightarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g})$	Reduksi secara tidak langsung hematite oleh CO
2.	$\frac{w}{4w-3}\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{s}) + \text{CO}(\text{g}) \rightarrow \frac{3}{4w-3}\text{Fe}_w\text{O}(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g})$	Reduksi secara tidak langsung magnetit oleh CO
3	$\text{Fe}_w\text{O}(\text{s}) + \text{CO}(\text{s}) \rightarrow w\text{Fe}(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g})$	Reduksi secara tidak langsung wustite oleh CO
4.	$3\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{s}) + \text{H}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g})$	Reduksi secara tidak langsung hematite oleh $\text{H}_2$
5	$\frac{w}{4w-3}\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{s}) + \text{H}_2(\text{g}) \rightarrow \frac{3}{4w-3}\text{Fe}_w\text{O}(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g})$	Reduksi secara tidak langsung magnetit oleh $\text{H}_2$
6.	$\text{Fe}_w\text{O}(\text{s}) + \text{H}_2(\text{g}) \rightarrow w\text{Fe}(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g})$	Reduksi secara tidak langsung wustit oleh $\text{H}_2$
7.	$\text{Fe}_w\text{O}(\text{s}) + \text{C}(\text{s}) \rightarrow w\text{Fe}(\text{l}) + \text{C}(\text{g})$	Reduksi langsung
8	$\text{C}(\text{s}) + \frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CO}(\text{g})$	Partial combustion
9	$\text{C}(\text{s}) + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{g})$	Full combustion
10	$\text{C}(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{CO}(\text{g})$	Reaksi solution loss
11	$\text{C}(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow \text{CO}(\text{g}) + \text{H}_2(\text{g})$	Reaksi uap air
12	$\text{CO}_2(\text{g}) + \text{H}_2(\text{g}) \leftrightarrow \text{CO}(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g})$	Reaksi pembentukan uap air
13	$\text{Volatile}(\text{f}) + \alpha_1\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \alpha_2\text{CO}_2(\text{g}) + \alpha_3\text{H}_2\text{O}(\text{g}) + \alpha_4\text{N}_2(\text{g})$	Pemakaran Volatil



## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

No	Reaksi Kimia	Keterangan
14	$\text{Volatile(f)} + \alpha_1 \text{CO}_2(\text{g}) \rightarrow \alpha_2 \text{CO}(\text{g}) + \alpha_3 \text{H}_2(\text{g}) + \alpha_4 \text{N}_2(\text{g})$	Reaksi <i>solution loss</i> pada volatil
15	$\text{SiO}_2(\text{s}) + \text{C}(\text{s}) \leftrightarrow \text{SiO}(\text{g}) + \text{CO}(\text{g})$	Gasifikasi silika pada kokas
16	$\text{SiO}_2(\text{s}) + 3\text{C}(\text{s}) \leftrightarrow \text{SiC}(\text{hm}) + 2\text{CO}(\text{g})$	Reaksi pembentukan SiC
17	$\text{SiC}(\text{s}) + \text{CO}(\text{g}) \leftrightarrow \text{SiO}(\text{g}) + 2\text{C}(\text{s})$	Reaksi gasifikasi SiC
18	$\text{SiO}_2(\text{slag}) + \text{C}(\text{s}) \rightarrow \text{SiO}(\text{g}) + \text{CO}(\text{g})$	Reaksi gasifikasi silka pada slag
19	$\text{SiO}(\text{g}) + \text{C}(\text{hm}) \rightarrow \text{Si}(\text{hm}) + \text{CO}(\text{g})$	Reaksi reduksi SiO

Tabel 2.3 Reaksi transformasi fasa pada proses peleburan di *blast furnace*

No	Formula Transformasi Fase	Keterangan
1	$\text{H}_2\text{O}(\text{s}) \leftrightarrow \text{H}_2\text{O}(\text{g})$	Penguapan
2	$\text{Fe}(\text{s}) \rightarrow \text{Fe}(\text{hm})$	Pencairan besi pada ore, sinter, pelet
3	$\text{Fe}_w\text{O}(\text{s}) \rightarrow \text{Fe}_w\text{O}(\text{slag})$	Pencairan wustit pada ore, sinter, pelet
4	$\text{SiO}_2(\text{i}) \rightarrow \text{SiO}_2(\text{slag})$	Pencairan silika pada ore, sinter, pelet
5	$\text{Al}_2\text{O}_3(\text{i}) \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3(\text{slag})$	Pencairan alumina pada ore, sinter, pelet
6	$\text{CaO}(\text{i}) \rightarrow \text{CaO}(\text{slag})$	Pencairan lime pada ore, sinter, pelet
7	$\text{MgO}(\text{i}) \rightarrow \text{MgO}(\text{slag})$	Pencairan magnesita pada ore, sinter, pelet





## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

8	Scrap $\rightarrow$ $\text{Fe(hm)} + \text{C(hm)} + \text{Si(hm)}$	Pencairan scrap
9	$\text{C(i)} \rightarrow \text{C(hm)}$	Dissolution karbon pada ore, sinter, pellet, kokas

### 2.7 Pemodelan *Blast Furnace*

#### 2.7.1 Aliran Fase Gas

Persamaan Ergun digunakan untuk menghitung dan memprediksi terjadinya *pressure drop* pada *blast furnace*. Persamaan ini telah banyak di observasi dan diterapkan dalam percobaan dan pemodelan seperti yang dilakukan oleh Castro, Austin dan Hayagi pada penelitian mereka. Dengan menggunakan persamaan Ergun distribusi tekanan pada *blast furnace* dapat di hitung dan diprediksi. Selain empirik dari Ergun persamaan Navier-Stokes juga dapat diterapkan untuk menghitung distribusi tekanan pada fluida yang memiliki viskositas (Nogami, 2006).

#### 2.7.2 Aliran Fase Solid

Untuk pemodelan aliran fase solid dapat menggunakan beberapa metode. *Discrete element method* (DEM) yaitu metode untuk mengakomodir pergerakan kontak partikel. Pada metode ini pergerakan seperti terjadi pada tipe elemen spring (Natsui, 2011). Model lain adalah dengan menggunakan model kinematik, akan tetapi model ini memiliki batasan pada fase solid karena tidak mengakomodir persamaan momentum sehingga model ini hanya mampu mengkalkulasi pada interaksi antar fase. Formulasi lain yang digunakan dalam pemodelan aliran fase solid adalah model *viscos flow*. Model ini memiliki kekurangan untuk memprediksi pergerakan fase solid akan tetapi model ini dapat mengakomodir persamaan momentum dan persamaan kontinuitas antas fase lebih mudah dilakukan. Dengan menggunakan model *viscos flow* maka area *deadman* tidak dapat diprediksi sehingga harus menerapkan asumsi dengan menaikkan nilai dari viskositas partikel pada area



deadmen. Untuk mengakomodir area deadmen dapat digunakan model teori *hypo-plasticity*. Teori ini berbasis finite element method (FEM) untuk memecahkan persoalan tegangan sehingga didapatkan laju deformasi.

### 2.7.3 Aliran Fase Cair

Fase cair pada *blast furnace* berada pada bagian bawah yaitu logam cair dan slag. Keduanya berinteraksi dengan berbagai fase seperti solid, gas dan partikel halus. Sifat dari logam cair dan slag mengalami perubahan seiring dengan perubahan temperatur dan komposisi kimia akibat terjadinya reaksi kimia pada area kohesif. Untuk pemodelan aliran fase cair dapat digunakan Navier-Stokes. Model ini mengakomodir aliran fase cair pada proses dengan adanya tekanan.

### 2.8 Analisis Numerik pada *Blast Furnace* berdasarkan Teori Multi-Fluid

Pemodelan pada penelitian ini menggunakan teori multi-fluid dimana semua fase seperti fase cair mengalami interaksi dengan momentum, massa dan energi. Jumlah fase dalam penelitian ini adalah enam. Keenam fase tersebut adalah fase gas, solid (kokas, sinter, ore, pellet, scrap), statik powder (SPC) dan statik powder berukuran halus (SFC), logam cair, slag, dinamik powder (DPC) dan dinamik powder berukuran halus (DFC). Ukuran kokas yang halus merupakan hasil degradasi dari kokas berukuran besar pada *blast furnace*, kokas dengan ukuran yang halus ini masuk dalam powder dinamik dimana akan bereaksi dengan fase lain seperti gas dan fase cair serta mengalami transformasi fisik.

Persamaan yang digunakan untuk pemodelan ini terdiri dari persamaan konservatif massa, momentum, energi panas, dan reaksi kimia dari setiap spesies fase yang ada dalam *blast furnace*. Persamaan konservatif secara keseluruhan yang digunakan dalam model ini seperti tertera dalam persamaan 2.10.



## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

$$\frac{\partial}{\partial x}(\varepsilon_i \rho_i u_i \phi_i) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \varepsilon_i \rho_i v_i \phi_i) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_{\phi_i} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \Gamma_{\phi_i} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + S_{\phi_i} \dots (2.10)$$

Dimana  $i$  adalah fase yang ada dalam pemodelan (gas, solid, kokas, sinter, pellet, scrap, ore, SPC, SFC, logam cair, slag, DPC dan DFC).  $\Gamma_{\phi_i}$  adalah koefisien transfer yang nilai bergantung pada variable yang ditentukan. Untuk mempermudah penyelesaian persamaan konservatif maka beberapa asumsi dilakukan diantaranya untuk perhitungan laju alir persamaan konservatif momentum menggunakan asumsi dinamik viskositas, untuk perpindahan panas persamaan konservatif energi menggunakan asumsi konduktivitas termal dan konveksi, untuk transfer massa persamaan konservatif masa komposisi yang dihitung pada persamaan 2.1 menggunakan asumsi fraksi massa pada setiap komponen yang akan dihitung.

### 2.8.1 Persamaan Momentum

Perubahan momentum dari fase gas ke fase solid dapat dihitung dengan menggunakan persamaan Ergun seperti pada persamaan 2.11 (Sungging, 2005)

$$F_{g-s} = 150 \mu_g \frac{1}{|\vec{U}_g - \vec{U}_s|} \left[ \frac{\varepsilon_g}{(1 - \varepsilon_g) d_g \phi_g} \right]^2 + 1,75 \rho_g \left[ \frac{\varepsilon_g}{(1 - \varepsilon_g) d_s \phi_s} \right] \dots (2.11)$$

Pada bagian atas *blast furnace*, kokas dan partikel bijih besi/ore dimasukkan membentuk struktur berlapis lapis di dalam *blast furnace*. Akibatnya pada area kohesif tersusun atas beberapa layer dengan sudut kemiringan  $\theta$  sehingga secara geometri dihitung secara anisotropik sesuai dengan persamaan 2.12

$$\vec{F}_g^s = \begin{vmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{vmatrix} \begin{vmatrix} R_{perp} & 0 \\ 0 & R_{perp} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{vmatrix} |\vec{U}_g - \vec{U}_s| (|\vec{U}_g - \vec{U}_s|) \dots (2.12)$$



## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Dimana  $R_{perp}$  dan  $R_{para}$  adalah koefisien flow dan paralel untuk struktur layer solid pada area kohesif dimana besarnya  $R_{perp}$  dan  $R_{para}$  adalah (Hiroshi, 2006) pada persamaan 2.13 – 2.14.

$$R_{perp} = \sum_k f_k R_k \text{ dan } \left( \frac{1}{\sqrt{R_{para}}} \right) = \sum_k \left( \frac{f_k}{\sqrt{R_k}} \right) \dots\dots\dots(2.13)$$

Dimana  $f_k$  dan  $R_k$  adalah

$$R_k = 150_g \frac{(1 - \varepsilon_g)^2 \mu_g}{|\vec{U}_g - \vec{U}_s| \varepsilon_g^3 \varphi_s d_s} + 1,75 \frac{(1 - \varepsilon_g) \rho_g}{\varepsilon_g^3 \varphi_s d_s} \dots\dots\dots(2.14)$$

Untuk momentum dari fase gas ke fase cair dan fase gas ke fase powder dapat dihitung dengan menggunakan persamaan yang digunakan oleh Richardson dan Zaki (Kmieć, 1976) seperti pada persamaan 2.15 – 2.16.

$$\vec{F}_g^i = -C_{d_{g-i}} \left[ \frac{3\varepsilon_i \rho_i}{4d_i \varphi_i} \right] |\vec{U}_g - \vec{U}_i| (\vec{U}_g - \vec{U}_i) \dots\dots\dots(2.15)$$

Dengan

$$C_{d_{g-i}} = \left[ \frac{24}{\text{Re}_{g-i}} (1 + a \text{Re}_{g-i}^b) + \frac{c}{1 + \frac{d}{\text{Re}_{g-i}}} \left( \frac{\varepsilon_g}{\varepsilon_g + \varepsilon_i} \right)^{-4,65} \right] \dots\dots\dots(2.16)$$

Dimana  $i$  adalah logam cair, slag, powder dan PC.  $a, b, c, d$  adalah fungsi bentuk dari partikel ( $\varphi$ ) sesuai dengan persamaan 2.17 – 2.20 (Yagi, 2006)

$$\text{Ln}(a) = 2,3288 - 6,4581 \varphi_i + 2,448 \varphi_i^2 \dots\dots\dots(2.17)$$

$$b = 0,0964 + 0,5565 \varphi_i \dots\dots\dots(2.18)$$



## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

$$\ln (c) = 4,905 - 13,8944 \varphi_i + 18,4222 \varphi_i^2 - 10,2599 \varphi_i^3 \dots (2.19)$$

$$\ln (d) = 1,4681 + 12,2584 \varphi_i - 20,7322 \varphi_i^2 + 15,8855 \varphi_i^3 \dots (2.20)$$

Untuk momentum dari fase solid ke fase cair dapat digunakan persamaan 2.21 – 2.23 yang digunakan oleh Kozeny-Carman (Wyllie, 1958) dimana fraksi volume fase cair sangat kecil

$$\vec{F}_s^l = \frac{\rho_l}{r_h} \left| \vec{U}_l - \vec{U}_s \right| \left( 5\beta + 0,4\beta^{0,1} \right) \left( \vec{U}_l - \vec{U}_s \right) \dots (2.21)$$

Dan nilai dari  $\beta$  adalah

$$\beta = \frac{\mu_l}{\rho_l \left| \vec{U}_l - \vec{U}_s \right| r_h} \dots (2.22)$$

Dimana

$$r_h = \frac{\varepsilon_l \varphi_s d_s}{6\varepsilon_s} \dots (2.23)$$

Untuk fase solid – powder dapat digunakan persamaan yang dikembangkan dari hasil eksperimen yang dilakukan oleh J Yagi dkk (Yagi, 2006) pada persamaan 2.24 – 2.28.

$$\vec{F}_s^i = \frac{F_k}{2D} \varepsilon_i \rho_i \left| \vec{U}_i - \vec{U}_s \right| \left( \vec{U}_i - \vec{U}_s \right) \dots (2.24)$$

Nilai D setara dengan

$$D = \frac{2\varphi_s d_s}{3\varepsilon_s} (1 - \varepsilon_s) \dots (2.25)$$

Dimana



$$F_k = \frac{10,5}{F_r^{1.33}} \text{ untuk } 0,003 < F_r < 0,5 \quad (\text{vertical})$$

.....(2.26)

$$F_k = \frac{14,98}{F_r^{1.33}} \text{ untuk } 0,003 < F_r < 0,5 \quad (\text{horizontal}) \dots\dots\dots (2.27)$$

Besarnya nilai  $F_r$  dapat dihitung dengan persamaan 2.28.

$$F_k = \frac{|\vec{U}_s - \vec{U}_i|}{\sqrt{gD}} \dots\dots\dots (2.28)$$

### 2.8.2 Persamaan Perpindahan Panas

Dengan asumsi powder statik bergerak bersamaan dengan fase solid maka temperatur powder statik memiliki nilai yang sama dengan fase solid. Oleh karena itu persamaan konservatif dapat diubah menjadi persamaan 2.29.

$$\frac{\partial}{\partial x} (\varepsilon_{sf} \rho_{sf} v_{sf} H_{sf}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \varepsilon_{sf} \rho_{sf} v_{sf} H_{sf}) = \dot{E}_{g,sf} + \dot{E}_{slag,sf} + \dot{E}_{hm,sf} + \sum \dot{E}_{h,sf} \dots\dots\dots (2.29)$$

Dimana  $\dot{E}$  adalah energy yang menyebabkan terjadinya perpindahan panas secara konveksi pada saat fase yang berbeda melakukan kontak. Energi yang menyebabkan terjadinya perpindahan panas secara konveksi dapat dihitung dengan persamaan 2.30.

$$E_i^j = h_{i-j} A_{i-j} [T_i - T_j] \dots\dots\dots (2.30)$$

Nilai koefisien konduksi dihitung dengan menggunakan persamaan Ranz – Marshall yang telah dikembangkan oleh Akiyama untuk pergerakan layer. Nilai koefisien konveksi antar fase dapat dihitung menggunakan persamaan 2.31 – 2.36

1. Fase gas - solid



## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

---

$$h_{g-s} = \frac{k_g}{d_s} \left[ 2 + 0,39(\text{Re}_{g-s})^{1/2} (\text{Pr}_g)^{1/3} \right] \dots\dots\dots (2.31)$$

2. Fase gas – cair (di gunakan oleh Mackey dan Warner )

$$h_{g-l} = 4,18 \times 10^{-4} (\varepsilon_g \rho_g u_g) C p_g (\varepsilon_l u_l)^{0,35} (\text{Re}_g)^{-0,37} (Sc_g / \text{Pr}_g)^{2/3} \dots\dots\dots (2.32)$$

3. Fase solid – cair

$$h_{l-s} = \frac{k_l}{d_s} \left( \frac{2\sqrt{\text{Re Pr}}}{1,55\sqrt{\text{Pr}} + 3,09\sqrt{0,372 - 0,15 \text{ Pr}}} \right) \dots\dots\dots (2.33)$$

4. Fase solid-powder

$$h_{eff} = 2 \sqrt{\frac{k_{eff} (C p_s \rho_s)_{eff}}{\pi_{c,eff}}} \dots\dots\dots (2.34)$$

Dimana

$$t_{c,eff} = \left( \frac{\varepsilon_g - \varepsilon_i}{|U_{eff}| A_s} \right) \dots\dots\dots (2.35)$$

5. Fase gas – powder

$$h_{g-i} = \frac{k_g}{d_i} \left[ 2 + 0,6(\text{Re}_{g-i})^{1/2} (\text{Pr}_g)^{1/3} \right] \dots\dots\dots (2.36)$$

Kontak area merupakan salah satu parameter yang menentukan perpindahan panas secara konveksi. Untuk menghitung luas area kontak material solid dapat menggunakan persamaan 2.37



$$A_s = \sum_m f_m \frac{6\varepsilon_m}{d_m \phi_m} \dots\dots\dots(2.37)$$

Untuk area solid – cair (slag dan logam cair ) perhitungan luas area dapat menggunakan persamaan 2.38 – 2.39 yang digunakan oleh Niu

$$\frac{A_{s-i}}{A_s} = 0,4 \operatorname{Re}_{s-i}^{0,218} We_{s-i}^{0,0428} Fr_i^{-0,0238} [1 + \cos \theta_{s-i}]^{-0,0235} \dots\dots(2.38)$$

Dimana

$$A_{s-i} = \left[ \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_g + \sum_i \varepsilon_i} \right] \left[ A_s - \sum_l A_{s-l} \right] \dots\dots\dots(2.39)$$

### 2.8.3 Persamaan Pergerakan Powder Statik

Powder statik adalah partikel dari arang berukuran kecil yang tidak terbakar akan mengalir bersama dengan aliran fase gas, bergerak masuk melalui celah celah yang ada pada susunan layer fase solid. Walaupun berupa statik powder akan tetapi fase ini tetap dapat terpisah dan bergabung dengan gas sehingga menjadi dinamik. Secara umum pergerakan powder statik ke bagian atas dari *blast furnace* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan konservatif seperti pada persamaan 2.40.

$$\frac{\partial}{\partial x} (\varepsilon_{fs} \rho_{sf} v_{fs} u_{fs}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \varepsilon_{fs} \rho_{sf} v_{fs}) = R_f \dots\dots\dots(2.40)$$

Dimana  $R_f$  adalah laju reaksi dari powder. Laju reaksi ini oleh Hideka diselesaikan dengan menggunakan perbedaan antara laju





## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

pergerakan powder dan laju masuk dari powder pada persamaan 2.41 – 2.43

$$R_f = r_s - r_d = \rho_f (k_f a \varepsilon_f - k_r a \varepsilon_{fs})$$

.....(2.41)

Dimana

$$k_f \alpha = \frac{1}{400} \left( 1 + \left( \frac{G_g}{G_f} \right)^{-3} \right) d_f^{1/2}$$

.....(2.42)

$$k_r a = k_f a (\varepsilon_{fo} / \varepsilon_{fso})$$

.....(2.43)

Perhitungan pergerakan ke atas powder dinamik dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.44 – 2.45

$$\varepsilon_{fo} = \frac{1}{\rho_f} \left( \frac{G_f}{G_f + G_g} \right)^{1.25} \left[ 200 \exp \left\{ -1.25(u_g - u_z) / \left( \frac{G_f}{G_f + G_g} \right) \right\} + 480 d_f^{1/3} \right]$$

.....(2.44)

Dengan nilai

$$G_f = \rho_f u_f \varepsilon_f; G = \rho_g u_g \varepsilon_g; u_z = 0,275 \left( \frac{\rho_g d_f v_{tf}}{\mu_g} \right)^{0,15} \dots(2.45)$$

Perhitungan pergerakan ke atas powder statik dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.46

$$\varepsilon_{fso} = 0,007 (\varepsilon_g u_g)^{-1,5} G_f^{0,2}$$

.....(2.46)

Dari persamaan 2.40 terdapat penambahan massa yang menyebabkan terjadinya reaksi kimia sehingga laju reaksi powder statik harus ditambahkan pada persamaan 2.40 sehingga persamaan menjadi persamaan 2.47 – 2.48.

$$\frac{\partial}{\partial x} (\varepsilon_{sf} \rho_{sf} u_s) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \varepsilon_{sf} \rho_{sf} v_s) = R_{chem} + R_f$$



.....( 2.47)

$R_{chem}$  adalah laju reaksi pada powder statik.

$$R_{chem} = S_{C, sf} + S_{SiO_2, sf} + S_{Al_2O_3, sf} + S_{CaO, sf} + S_{MgO, sf} \dots\dots\dots(2.48)$$

### 2.9 MBF Anyang Steel

Salah satu MBF yang dikembangkan oleh *Anyang Steel* memiliki *inner volume* 300 m<sup>3</sup>. Adapun data-data properties dari MBF 300 m<sup>3</sup> disajikan dalam Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Data dimensi MBF 300 m<sup>3</sup> *Anyang Steel* (Pandey, 2001)

Item	Unit	Parameter
<i>BF Inner volume</i>	m <sup>3</sup>	300
<i>Dia.of throat</i>	mm	3700
<i>Dia.of belly</i>	mm	5600
<i>Dia of hearth</i>	mm	4900
<i>Height of throat</i>	mm	1800
<i>Height of shaft</i>	mm	9300
<i>Height of belly</i>	mm	1100
<i>Height of bosh</i>	mm	2800
<i>Height of hearth</i>	mm	2600
<i>Effective working heighth</i>	mm	17600
<i>Bosh angle</i>	°	81,51
<i>Shaft angle</i>	°	84,25

Sedangkan data operasi MBF ditampilkan dalam Tabel 2.5.



## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

---

Tabel 2.5 Data operasi MBF *Anyang Steel* (Pandey, 2001)

<b>Deksripsi</b>	<b>Unit</b>	<b>Parameter</b>
<i>Produktifitas</i>	$\text{t/m}^3 \cdot \text{d}$	2,61
<i>Smelting Intensity</i>	$\text{t/m}^3 \cdot \text{d}$	1,53
<i>Coke rate</i>	kg/thm	510
<i>PCI rate</i>	kg/thm	76
<i>Fuel rate</i>	kg/thm	586
<i>Top Gas Temperatur</i>	°C	150
<i>Blast Temperature</i>	°C	1100
<i>Oxygen enrichment</i>	%	1,2
<i>Indirect reduction ratio</i>	-	0,52
<i>Hot metal temperature</i>	°C	1450
<i>Si in hot metal</i>	%	0,70
<i>S in hot metal</i>	%	0,03
<i>Slag basicity</i>	-	1,2
<i>Slag volume</i>	kg/thm	400



## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Data material balance dari MBF *Anyang Steel* ditunjukkan dalam Tabel 2.6

Tabel 2.6 *Material balance* dari *Anyang Steel* MBF (Pandey, 2001)

Deskripsi	Kilogram/ton hot metal	Persentase (%)
<b><i>Material Input</i></b>		
<i>Iron bearing burden</i>	1758	42,7
<i>Flux dan limestone</i>	35	0,8
Kokas	510	12,4
Batubara sebagai PCI	76	1,8
<i>Blast panas</i>	1739	42,2
Total	4118	100
<b><i>Material Output</i></b>		
<i>Hot Metal</i>	1000	24,3
<i>Slag</i>	450	10,9
<i>Top Gas</i>	2524	12,4
<i>Moisture</i>	70	1,8
<i>Dust</i>	74	42,2
Total	4118	100

Dalam Tabel 2.7 merupakan data komposisi *burden material* yang digunakan dalam berbagai proses *blast furnace* di Cina.



## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Tabel 2.7 Data komposisi material yang digunakan pada berbagai *blast furnace* di Cina (Pandey, 2001)

	<b><i>Iron Ore</i></b>	<b><i>Sinter</i></b>
<b><i>Chemical Analysis, %</i></b>		
Fe	40-45	53-54
FeO	-	11-12
CaO	8	10,5-12
SiO <sub>2</sub>	13-14	8,5-9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2	-
MgO	1	2,5
S	0,03-0,04	
Tumbler Index	-	81-82
Basisitas	-	1,2-1,4
<b><i>Karakteristik Kokas, %</i></b>		
Ash	13,5-14	
Senyawa Volatil	0,7-1,4	
Sulfur	0,25-0,75	
Moisture	7,5-8,0	
Size (mm)	25-60	

### 2.10 Penelitian Sebelumnya

#### 2.10.1 Pengaruh Diameter Kokas dan Konsentrasi Oksigen Blast pada Operasi Kupola

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Natsuo Ishiwata, Yuki Iwai, Ryota Murai, Yoshitaka Sawa dan Michitaka Sato dengan judul *Effect of Coke Diameter and Oxygen Concentration of Blast on Cupola Operation* (Ishiwata, 2011) memberikan kesimpulan meningkatkan rasio campuran kokas



berdiameter kecil menurunkan rasio pemanfaatan gas dan meningkatkan laju kokas. Perubahan ini disebabkan peningkatan reaksi kerugian solusi karena area spesifik meningkat dari kokas ketika kokas diameter yang lebih kecil digunakan.

### **2.10.2 Analisa Numerik Performa *Blast Furnace* dengan Bahan Masukan Baru menggunakan Simulator Multi-Dimensi berbasis Teori Multi Fluida**

Penelitian dilakukan oleh Hiroshi Nogami, Mansheng Chu dan Jun-Ichiro yagi mengenai studi penggunaan *Carbon Composite Agglomerates* pada *blast furnace* dengan menggunakan simulator *blast furnace* (Nogami, 2006). Pada penelitian tersebut dijelaskan mengenai persamaan-persamaan yang digunakan dalam simulator *blast furnace* dan metode untuk penyelesaian solusi pemodelannya yang juga akan digunakan dalam penelitian kali ini.

### **2.10.3 Pengaruh Ukuran Kokas pada Pengoperasian Kupola**

Penelitian dilakukan oleh Nobutaro Kayama, Katsutoyo Nozaki dan Takio Takamori untuk mengetahui efek dari ukuran kokas terhadap kondisi operasi kupola dan properti dari pengecoran (Kayama, 1957). Dengan ukuran *internal diameter* 520 mm, tinggi efektif 2310 mm, rasio tuyer 5.

Ukuran kokas yang digunakan dalam eksperimen:

1. Ukuran besar, 100-120mm, 1/5-1/4 dari diameter dalam kupola
2. Ukuran sedang, 60-80mm, 1/9-1/6 dari ukuran diameter dalam kupola
3. Ukuran kecil, 30-50mm, 1/17-1/10 dari ukuran diameter dalam kupola
4. Ukuran campuran, campuran ketiga ukuran sebelumnya dengan perbandingan jumlah yang sama

Hasil yang diperoleh sebagai berikut:

1. Pada kondisi operasi: dengan ukuran kokas yang semakin kecil, jumlah karbon dioksida yang tidak terpakai keluar dari kupola menurun, temperatur *tapping* turun, dan susunan kokas menurun sangat cepat (laju *coke rate* meningkat drastis). Adapun nilai rata-rata temperatur tapping dari setiap variasi



## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

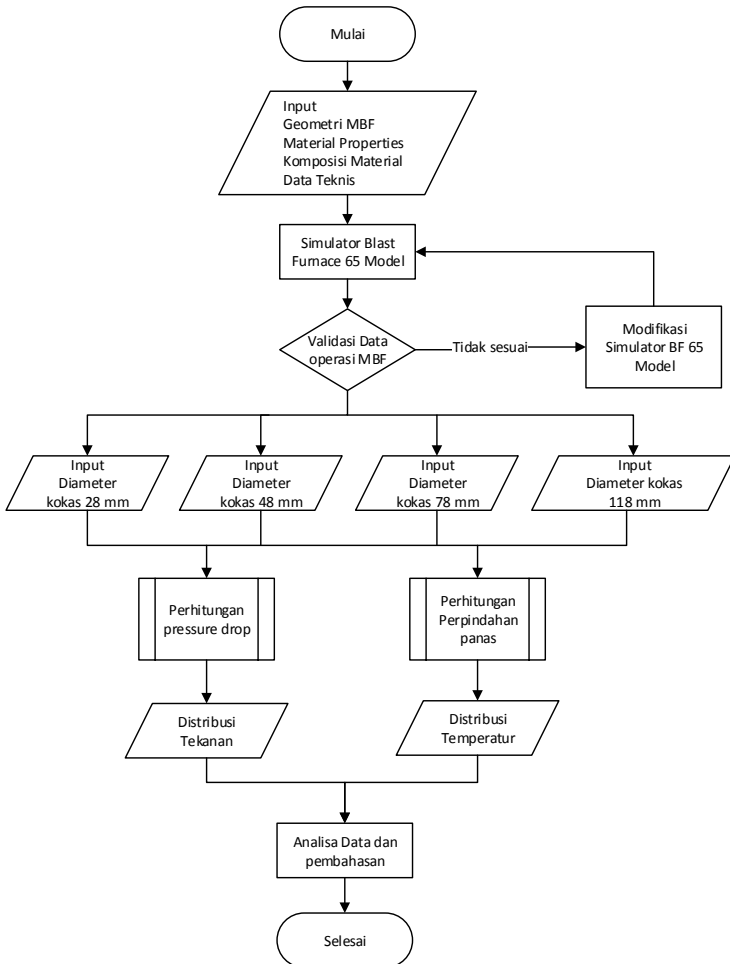
---

ukuran yaitu 1500°C untuk ukuran besar, 1490°C untuk ukuran sedang, 1350°C untuk ukuran kecil dan 1470°C untuk ukuran campuran.

2. Pada kondisi *tapping*: Hasil terbaik didapatkan dengan ukuran kaokas sedang, hasil kedua adalah ukuran kecil, namun jalur turunnya logam cair terhambat oleh kokas dikarenakan menurunnya temperatur *tapping*, pada kondisi ukuran besar logam cair sangat lancar melewati kokas namun sangat reaktif dikarenakan temperatur *tapping* yang tinggi.

## BAB III METODOLOGI

### 3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram alir metode penelitian pemodelan MBF dengan variasi diameter kokas





## BAB III METODOLOGI

---

### 3.2 Prosedur Pemodelan

Pemodelan MBF untuk mengetahui fenomena yang terjadi di dalamnya pada penelitian ini memerlukan beberapa tahapan. Tahapan tahapan ini terbagi dalam empat tahapan yaitu:

#### 3.2.1 Persiapan Data

Dalam penelitian ini, terlebih dahulu dilakukan persiapan data. Persiapan data diperlukan karena dapat menentukan hasil dari perhitungan pada pemodelan yang dilakukan. Data data yang diperlukan diantaranya adalah:

1. Geometri MBF
2. *Material properties* udara, *burden material*, dan koefisien reaksi
3. Komposisi bijih besi dan kokas
4. Data teknis MBF
5. Data variasi ukuran diameter kokas adalah 28 mm, 48 mm, 78 mm, dan 118 mm berdasarkan pendekatan ukuran kokas pada penelitian pengaruh kokas pada kupola (Kayama, 1957).

#### 3.2.2 Perhitungan *Mass Balance* untuk MBF

Perhitungan mass balance digunakan untuk mendapatkan data teknis berupa input kecepatan bijih besi masuk, kecepatan kokas masuk, kecepatan udara masuk, komposisi bijih besi yang baru karena pada program dianggap semua bijih besi, sinter dan kapur dimasukkan dalam komposisi bijih besi.

#### 3.2.3 Pembuatan Model MBF

Pembuatan model MBF dilakukan dengan menggunakan model dari MBF *Anyang Steel*, sehingga dalam simulator *Blast Furnace* yang digunakan oleh peneliti sebelumnya akan dilakukan perubahan terhadap beberapa bagian berikut:

1. *Working volume* dari MBF

*Working volume* dari model MBF seperti yang tertera pada keterangan Gambar 3.2 yaitu 300 m<sup>3</sup>. Pengaturan *working volume* ini dengan jalan memberikan input diameter dan ketinggian pada subprogram *input.dat*.



### 2. Jumlah dan dimensi tuyer

Jumlah tuyer yang digunakan pada pemodelan *blast furnace* ini adalah 14 buah. Sama halnya dengan penentuan *working volume*, jumlah tuyer pada model *blast furnace* juga dimasukkan pada subroutines input yang merupakan file masukan untuk memulai perhitungan. Dan juga dilakukan perubahan dimensi tuyere sesuai data MBF.

#### 3.2.4 Validasi dengan Data Trial MBF

Menggunakan hasil data plot dua dimensi dari hasil running simulator *blast furnace* yang telah diubah data inputnya sesuai MBF untuk membandingkan dengan data trial MBF yaitu data operasi MBF *Anyang Steel*.

### 3.3 Software dan Bahasa Pemrograman

Bahasa pemrograman yang digunakan dalam pemodelan *blast furnace* ini adalah bahasa program fortran. Bahasa program dalam penelitian ini di ambil dari *Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials Tohoku University* melalui peneliti sebelumnya dimana selanjutnya dilakukan modifikasi sesuai dengan parameter penelitian yang dilakukan. Bahasa program terdiri dari 122 *subroutine* dengan menitik beratkan pada perhitungan reaksi kimia, perpindahan panas, perhitungan tekanan, perhitungan kecepatan alir pada beberapa fase. Program berbasis fortran ini diberi kode BF65 Model.

#### 3.3.1 Compaq Visual Fortran

Merupakan salah satu compiler (program untuk membuat dan mengeksekusi bahasa fortran) untuk mendapatkan data hasil perhitungan program yang dibuat.

#### 3.3.2 Understand

Program untuk memodifikasi BF65 Model agar sesuai untuk penelitian MBF *Anyang Steel* 300 m<sup>3</sup>.



## BAB III METODOLOGI

---

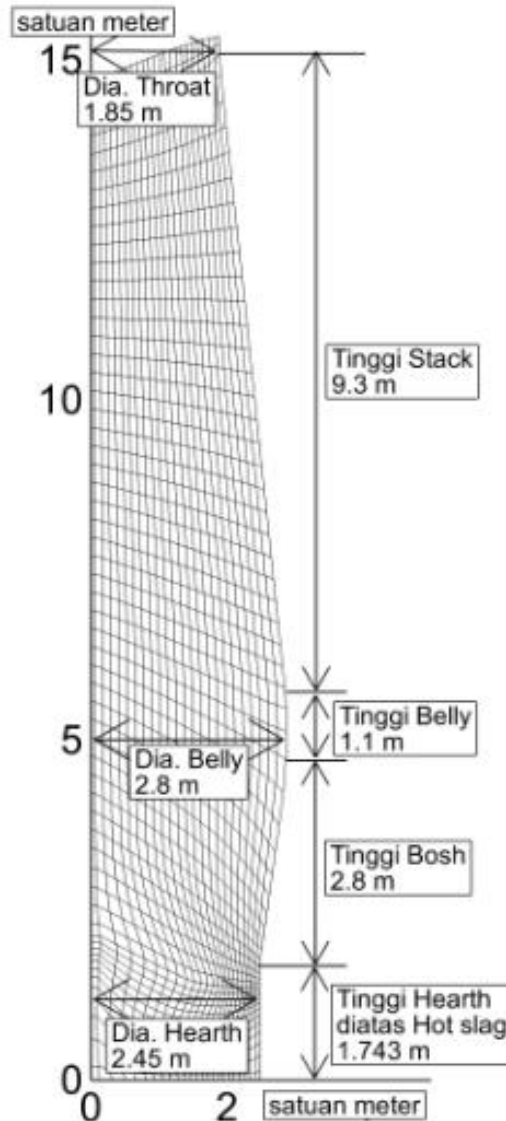
### 3.3.3 Tecplot 2015

Program untuk menampilkan data visualisasi dua dimensi fenomena di dalam MBF.

### 3.4 Geometri MBF

Pada penelitian ini pemodelan performa MBF dimulai dengan melakukan pengumpulan data dukung seperti geometri *blast furnace*, komposisi bijih besi yang akan digunakan dalam produksi, material properties dari bahan yang diumpankan ke dalam MBF, dan kapasitas produksi yang akan digunakan. Pada pemodelan ini volume kerja MBF yang akan digunakan adalah 300 m<sup>3</sup> dengan geometri MBF dengan spesifikasi geometri sebagai berikut

1. Tinggi 17,6 meter
2. Diameter dalam 3,7 meter sampai 5,6 meter
3. Jumlah tuyer 14 buah
4. Diameter tuyer 4,8 sentimeter
5. Panjang *nose* tuyer 3,5 sentimeter
6. Posisi tuyere 1,3 meter di atas lubang tapping slag



Gambar 3.2 Mesh geometri 2 dimensi MBF



## BAB III METODOLOGI

### 3.5 Komposisi *Material* yang digunakan dalam Program

#### 3.5.1 Bijih Besi

Masukan persentase bijih besi, sinter dan batu kapur dalam program dianggap sebagai kesatuan dalam inputan bijih besi. Berikut data komposisi bijih besi yang baru hasil campuran dari data komposisi bijih besi, sinter dan batu kapur dari material Cina yang telah dijelaskan pada bagian 2.8. Pada pemodelan ukuran *ore* yang digunakan pada setiap variasi ukuran kokas adalah diameter 1,25 cm sesuai data material Cina (Pandey, 2001)

Tabel 3.1 Komposisi bijih besi (Pandey ,2001)

No	Parameter	Unit	Nilai
1	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	% berat	60,44
2	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	% berat	1,91
3	$\text{FeO}$	% berat	9,48
4	$\text{H}_2\text{O}$	% berat	4,42
5	$\text{SiO}_2$	% berat	9,42
6	$\text{Al}_2\text{O}_3$	% berat	0,33
7	$\text{MgO}$	% berat	2,58
8	$\text{CaO}$	% berat	11,41

#### 3.5.2 Kokas

Komposisi kokas yang digunakan dalam program MBF adalah data komposisi dari material Cina yang telah dijelaskan pada bagian 2.8. Adapun ukuran diameter kokas yang digunakan pada MBF *Anyang* yaitu 4,8 cm (Pandey, 2001).



Tabel 3.2 Komposisi kokas yang digunakan MBF (Pandey, 2001)

No	Komposisi	Unit	Nilai
1	C	% berat	77,45
2	H <sub>2</sub> O	% berat	7,75
3	SiO <sub>2</sub>	% berat	1,05
4	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% berat	12,53
5	CaO	% berat	0,9
6	MgO	% berat	0,32

### 3.5.3 PCI (Batubara)

Komposisi PCI yang digunakan dalam program MBF adalah dari data masukan penelitian sebelumnya dengan data laju material masuk tetap dari data *material balance*.

Tabel 3.3 Komposisi PCI (batubara) (Sungging, 2005)

No	Komposisi	Unit	Nilai
1	PC <i>Ash</i>	% berat	8,9
2	Total C	% berat	81,1
3	Total H	% berat	4,2
4	Total O	% berat	3,7
5	Total N	% berat	1,6

### 3.5.4 Udara Panas (*Hot Blast*)

Komposisi gas yang digunakan dalam program MBF adalah data udara umum yang telah dimasukkan pengayaan oksigen sebesar 1.2% seperti dijelaskan dalam data operasi MBF *Anyang Steel* pada bagian 2.8



## BAB III METODOLOGI

---

Tabel 3.4 Komposisi *hot blast* (Pandey, 2001)

No	Komposisi	Unit	Nilai
1	O <sub>2</sub>	% berat	22,2
2	N <sub>2</sub>	% berat	77,74
3	H <sub>2</sub> O	% berat	0,06

### 3.6 Laju Material Masuk dalam MBF

Dari data *material balance* MBF *Anyang Steel* dibuat data laju konsumsi material persekonnya dikarenakan pada perhitungan digunakan laju material dalam kilogram persekon. Perhitungan laju material berdasarkan data produktifitas dari data MBF *Anyang Steel* (bagian 2.8). Data laju material dapat dilihat pada Tabel 3.5

Tabel 3.5 Laju material masuk (Pandey, 2001)

No	Material Input	Unit	Laju
1	Bijih Besi	kg/s	15,15
2	Kokas	kg/s	4,34
3	PCI / batubara	kg/s	0,65
4	Udara Panas	kg/s	14,81

### 3.7 Material Properties

Di dalam *blast furnace* saat beroperasi terdapat berbagai macam fase dari bahan yang diumpangkan. Beberapa fase mengalami perubahan dari fase solid menjadi cair dan gas karena pengaruh temperature dan tekanan operasi. Selain itu juga dikarenakan adanya reaksi kimia baik reduksi secara langsung atau reduksi secara tidak langsung. Pada penelitian ini jumlah fase yang dimodelkan adalah enam fase dengan spesies kimia dan fase seperti tersaji dalam Tabel 3.6.



Tabel 3.6 Fase dan spesies kimia (Sungging, 2005)

Fase	Spesies Kimia ( $\omega_i$ )	
Gas	CO, CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, N <sub>2</sub> , SiO,	
Solid	Ore	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, Fe, CaO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, SiO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O
	Sinter	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, Fe, CaO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, SiO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O
	Pellet	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, Fe, CaO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, SiO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O
Logam cair	Fe, C, Si	
Slag	FeO, SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaO, MgO	
Batubara dan kokas	C, SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaO, MgO, volatil	
Fine ore/flux	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, Fe, CaO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, SiO <sub>2</sub>	

Pada penelitian ini sifat material pada enam fase dalam model akan dihitung dengan menggunakan pendekatan numerik seperti yang tertera pada bagian 2.7.

### 3.7.1 Sifat Fase Gas

Berat jenis dari fase gas dihitung menggunakan hukum gas ideal pada persamaan 3.1.

$$\rho_g = \frac{P_g}{RT_g} \sum \omega_{j,g} M_j \dots \dots \dots (3.1)$$

Dimana j adalah spesies dari gas. Viskositas dari spesies kimia gas dihitung dengan menggunakan teori statistika mekanika seperti pada persamaan 3.2





### BAB III METODOLOGI

$$\mu_g = 2,6693 \times 10^{-6} \frac{1}{\Omega_{\mu,j}} \sqrt{\frac{M_j T_g}{\sigma_j}} \dots \dots \dots (3.2)$$

Dengan

$$\Omega_{\mu,j} = \frac{1,16145}{(T^*)^{0,14874}} + \frac{0,52487}{\exp(0,7732T^*)} + \frac{2,16178}{\exp(2,43787T^*)} \dots \dots \dots (3.3)$$

$$T^* = \frac{k_{Boltzman} T_g}{\epsilon_j} \dots \dots \dots (3.4)$$

Untuk konduktivitas termal pada gas dapat dihitung dengan menggunakan pendekatan Eucken's poliatomik pada persamaan 3.5.

$$k_j = M_j \left( C_{P,j} + \frac{5R}{4M_j} \right) \dots \dots \dots (3.5)$$

Pada persamaan 3.6 – 3.7 digunakan untuk menghitung nilai entalpi dan *specific heat* pada fase gas

$$H_g = \sum_{j \in g} \omega_{j,g} \left[ \Delta H_{j,g}^{298K} + \int_{298K}^{T_g} C_{P,j}(T) dT \right] \dots \dots \dots (3.6)$$

$$C_{P,j}(T) = a_j + b_j T + c_j T^{-2} \dots \dots \dots (3.7)$$

Koefisien transfer untuk persamaan perhitungan entalpi dihitung dengan persamaan 3.8

$$\Gamma_{H_g Z} = \frac{\Delta W k_{g,1}^* + \Delta V k_{g,2}^*}{\sqrt{\Delta W^2 + \Delta V^2}}; \Gamma_{H_g Z} = \frac{\Delta W k_{g,2}^* + \Delta V k_{g,1}^*}{\sqrt{\Delta W^2 + \Delta V^2}} \dots \dots \dots (3.8)$$

Dimana  $\Delta W$  dan  $\Delta V$  adalah perbedaan kecepatan antara fase gas dan fase solid pada orientasi vertikal dan horizontal.



Tabel 3.7 Koefisien untuk persamaan *heat capacity* fase gas (Sungging, 2005)

Spesies	$a_j$ [kJ/kmol K]	$b_j$ [kJ/kmol K]. $10^{-3}$	$c_j$ [kJ/kmol K]. $10^{-6}$
O <sub>2</sub>	25,59	12,25	-4,20
CO	26,54	7,68	-1,17
CO <sub>2</sub>	26,75	42,26	-14,25
H <sub>2</sub>	29,06	-0,82	1,99
H <sub>2</sub> O	30,20	9,93	1,12
N <sub>2</sub>	27,02	5,81	-0,29
SiO	33,42	2,982	-0,52

Tabel 3.8 Panas pembentukan [kcal/kmol] (Sungging, 2005)

Spesies (gas)	$\Delta H_f^{298\text{ K}}$
O <sub>2</sub>	0
CO	-26416
CO <sub>2</sub>	-94052
H <sub>2</sub>	0
H <sub>2</sub> O	-57798
N <sub>2</sub>	0
SiO	-24200

### 3.7.2 Sifat Fase Solid

Sifat pada fase solid dihitung berdasarkan komposisi dan sifat komponen penyusun dari fase solid itu sendiri. *Specific heat*



### BAB III METODOLOGI

dari komponen dan sifat komponen penyusun fase solid dihitung dengan menggunakan persamaan 3.9.

$$C_{P,k} = a_k + b_k T_s + \frac{c_k}{T_s^2}; C_{P,S} = \sum_{k \in S} C_{P,k} \omega_{k,S} \dots \dots \dots (3.9)$$

Tabel 3.9 Koefisien untuk persamaan *heat capacity* fase solid dan powder (Castro, 2000)

Spesies	a <sub>j</sub> [kcal/kmol K]	b <sub>j</sub> [kcal/kmol K <sup>-2</sup> ]	c <sub>j</sub> [kcal/kmol K <sup>-1</sup> ]
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24,72	0,01604	-423400
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	41,17	0,01882	-979500
FewO	12,62	0,00149	-76200
Fe	8,4	0	0
SiO <sub>2</sub>	10,95	0,0055	0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,08	0,00897	-522500
CaO	10	0,00484	-108000
MgO	10,86	0,00119	-208700
C	4,03	0,00114	-204000
SiC	8,89	0,00291	-284000
H <sub>2</sub> O	18,16	0	0
Volatil	4,03	0,00114	-204000

Untuk perhitungan sifat entalpi dari fase solid menggunakan persamaan 3.10.

$$H_s = \sum_{k \in S} \omega_k \left[ \Delta H_k^{298K} + \int_{298K}^{T_s} C_{P,k}(T) dT \right] \dots \dots \dots (3.10)$$



Tabel 3.10 Panas pembentukan [kcal/kmol] (Castro, 2000)

Spesies (i)	$\Delta H_i^{298\text{ K}}$	Spesies (i)	$\Delta H_i^{298\text{ K}}$
CaO	-151700	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-198500
MgO	-143840	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	-266900
C	-1000	Fe <sub>w</sub> O	-64620
SiC	-28000	Fe	0
H <sub>2</sub> O	-68317	SiO <sub>2</sub>	-217500
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-399090		

Dimana k adalah kokas, sinter, pellet, dan ore

Konduktivitas termal fase solid pada tiap layer untuk perhitungan perpindahan panas dihitung dengan menggunakan persamaan 3.11 – 3.14.

$$k_{s,\text{eff}} = (1 - \varepsilon_s)(k_g + a) + \varepsilon_s \left[ \frac{2}{3k_s} + \left( \frac{k_g}{0.274} + b \right)^{-1} \right]^{-1} \dots\dots\dots (3.11)$$

$$a = \alpha \left[ 1 + \left( \frac{1 - \varepsilon_s}{\varepsilon_s} \right) \left( \frac{1 - e_s}{2e_s} \right) \right]^{-1} \dots\dots\dots (3.12)$$

$$b = \alpha \left( \frac{e_s}{2 - e_s} \right) \dots\dots\dots (3.13)$$

$$\alpha = 0,1952 d_s \left( \frac{T_s}{100} \right)^3 \left( \frac{4,184}{3600} \right) \dots\dots\dots (3.14)$$

### 3.7.3 Sifat Logam Cair

Berat jenis, viskositas dan konduktivitas termal dari logam cair bergantung dari temperatur. Perubahan temperatur akan



## BAB III METODOLOGI

membuat nilai sifat sifat tersebut menjadi berubah (Yagi, 2003) seperti pada persamaan 3.15 – 3.17.

$$\rho_{hm} = 8586 - 0,8577T_{hm} - \frac{6300\omega_{C, hm}}{\omega_{C, hm} + \omega_{Fe, hm} + \omega_{Si, hm}} \dots\dots(3.15)$$

$$k_{hm} = 0,0158T_{hm} \dots\dots\dots(3.16)$$

$$\mu_{hm} = 0,0967 \times 10^{-3} \exp\left(\frac{58,9 \times 10^3}{8,314T_{hm}}\right) \dots\dots\dots(3.17)$$

### 3.7.4 Sifat Slag Cair

Berat jenis dan konduktivitas termal slag diasumsikan konstan. Untuk viskositas dari slag tergantung dari komposisi komponen pembentuk slag dan temperatur. Persamaan 3.18–3.20 digunakan untuk menghitung ketiga sifat dari slag saat proses peleburan di *blast furnace*.

$$k_{slg} = 0,57 \dots\dots\dots (3.18)$$

$$\mu_{slg} = 0,1 \times 10^{p^+} \dots\dots\dots (3.19)$$

$$\begin{aligned} p^+ = & 1,7089 \left( \frac{\omega_{CaO, slg}}{\omega_{SiO_2, slg}} \right)^2 - 4,7419 \left( \frac{\omega_{CaO, slg}}{\omega_{SiO_2, slg}} \right) + 0,9331 (\omega_{MgO, slg})^2 \\ & - 1,8862 (\omega_{MgO, slg}) + 7,99 (\omega_{Al_2O_3, slg})^2 - 1,0317 (\omega_{Al_2O_3, slg}) \\ & + \frac{4,2687 \times 10^6}{(T_{slg} - 273,15)^2} + \frac{2,6754 \times 10^3}{T_{slg} - 273,15} + 0,2575 \dots\dots\dots (3.20) \end{aligned}$$

### 3.7.5 Sifat Powder

Faktor bentuk dan diameter, dan berat jenis dari powder diasumsikan konstan dan secara spesifik digunakan sebagai data



inputan pada program. Spesifik heat dan temperatur dihitung sama dengan fase solid.

Tabel 3.11 Parameter powder pada pemodelan (Nogami, 2006).

Item	Unit	Nilai
Diameter	m	$10^{-4}$
Berat Jenis	$\text{kg/m}^3$	500
Faktor Bentuk	-	1

Tabel 3.12 Berat molekuler [kg/kmol] (Nogami, 2006)

$M_{\text{Fe}}$	55,85	$M_{\text{H}}$	1,008	$M_{\text{Mg}}$	24,31
$M_{\text{O}}$	16	$M_{\text{C}}$	12,01	$M_{\text{Al}}$	26,98
$M_{\text{N}}$	14,01	$M_{\text{Si}}$	28,09	$M_{\text{Ca}}$	40,08

### 3.8 Persamaan Inputan pada Pemodelan

Berdasarkan persamaan konservatif jumlah kualitatif material umpan dan penambahan massa mengakibatkan terjadinya reaksi kimia dan transformasi fase. Seperti yang dijelaskan pada bab 2 dalam penelitian ini terdapat sembilan belas reaksi kimia dan sembilan transformasi fase. Momentum terjadi karena perbedaan tekanan pada beberapa fase (fase gas ,solid) dan gravitasi. Entalpi muncul karena adanya perpindahan panas antar fase, panas karena reaksi dan panas yang menyertai transport massa yang mengakibatkan reaksi kimia dan transformasi fase. Pada Tabel 3.13 merangkum semua inputan momentum pada semua fase, Tabel 3.14 menyantumkan persamaan energi yang digunakan, dan Tabel 3.15 mencantumkan persamaan input yang digunakan sebagai inputan persamaan reaksi kimia.



### BAB III METODOLOGI

Tabel 3.13 Persamaan momentum tiap fase (Castro, 2000)

Fase	Persamaan Momentum
Gas	$S_\phi = -\text{grad}[P_g] - \vec{F}_g^s - \vec{F}_g^{\text{hm}} - \vec{F}_g^{\text{slg}} - \vec{F}_g^{\text{pc}} - \vec{F}_g^f$
Solid	$S_\phi = -\text{grad}[P_s] - \vec{F}_s^g$
Logam cair	$S_\phi = -\vec{F}_{\text{hm}}^s - \vec{F}_{\text{hm}}^g + \rho_{\text{hm}} \epsilon_{\text{hm}} \vec{g}$
PCI	$S_\phi = -\vec{F}_{\text{pc}}^s - \vec{F}_{\text{pc}}^g + \rho_{\text{pc}} \epsilon_{\text{pc}} \vec{g}$
Slag	$S_\phi = -\vec{F}_{\text{slg}}^s - \vec{F}_{\text{slg}}^g + \rho_{\text{slg}} \epsilon_{\text{slg}} \vec{g}$
Fines/Flux	$S_\phi = -\vec{F}_f^s - \vec{F}_f^g + \rho_f \epsilon_f \vec{g}$

Tabel 3.14 Persamaan energi setiap fase (Castro, 2000)

Fase	Persamaan Energi
Gas	$S_\phi = -\dot{E}_g^s - \dot{E}_g^{\text{hm}} - \dot{E}_g^{\text{slg}} - \dot{E}_g^{\text{pc}} - \dot{E}_g^f + \sum R_n \Delta H_n$
Solid	$S_\phi = -\dot{E}_s^g - \dot{E}_s^{\text{hm}} - \dot{E}_s^{\text{slg}} - \dot{E}_s^{\text{pc}} - \dot{E}_s^f + \sum R_n \Delta H_n$
Hot metal	$S_\phi = -\dot{E}_{\text{hm}}^g - \dot{E}_{\text{hm}}^s + \sum R_n \Delta H_n$
Arang	$S_\phi = -\dot{E}_{\text{pc}}^g - \dot{E}_{\text{pc}}^s + \sum R_n \Delta H_n$
Slag	$S_\phi = -\dot{E}_{\text{slg}}^g - \dot{E}_{\text{slg}}^s + \sum R_n \Delta H_n$
Fines/flux	$S_\phi = -\dot{E}_f^g - \dot{E}_f^s + \sum R_n \Delta H_n$



Tabel 3.15 Persamaan fraksi massa dari setiap spesies kimia  
(Castro, 2000)

Spesies	Persamaan Fraksi Massa
CO	$S_{\text{CO}} = M_{\text{CO}} \left( \begin{array}{l} -R_{1_i} - R_{2_i} - R_{3_i} + R_{7_i} + R_{8_i} + 2R_{10_i} + R_{11_i} + R_{12_i} + \alpha_6 R_{14_i} + R_{15_i} \\ + 2R_{16_i} + R_{18_i} - R_{17_i} + R_{18_i} + R_{19_i} + R_{20_i} + 2R_{21_i} + 2R_{22_i} + 4R_{23_i} + 3R_{24_i} \\ + 6R_{25_i} + 4R_{26_i} + 8R_{27_i} \end{array} \right)$
CO <sub>2</sub>	$S_{\text{CO}_2} = M_{\text{CO}_2} \left( \begin{array}{l} + R_{1_i} + R_{2_i} + R_{3_i} + R_9 - R_{10_i} - R_{12_i} + \alpha_2 R_{13_i} \\ - \alpha_5 R_{14_i} - R_{21_i} - 2R_{23_i} - 3R_{25_i} - 4R_{27_i} \end{array} \right)$
H <sub>2</sub>	$S_{\text{H}_2} = M_{\text{H}_2} \left( \begin{array}{l} -R_{4_i} - R_{5_i} - R_{6_i} + R_{11_i} - R_{12_i} + \alpha_7 R_{14_i} + 2R_{20_i} \\ + 2R_{21_i} + 3R_{22_i} + 3R_{23_i} + 4R_{24_i} + 4R_{25_i} + 5R_{26_i} + 5R_{27_i} \end{array} \right)$
H <sub>2</sub> O	$S_{\text{H}_2\text{O}} = M_{\text{H}_2\text{O}} \left( + R_{4_i} + R_{5_i} + R_{6_i} - R_{11_i} + R_{12_i} + \alpha_3 R_{13_i} \right)$
N <sub>2</sub>	$S_{\text{N}_2} = M_{\text{N}_2} (\alpha_4 R_{13_i} + \alpha_8 R_{14_i})$
O <sub>2</sub>	$S_{\text{O}_2} = M_{\text{O}_2} (-0.5R_{8_i} - R_{9_i} - \alpha_1 R_{13_i} - 0.5R_{20_i} - R_{22_i} - 1.5R_{24_i} - 2R_{26_i})$
SiO	$S_{\text{SiO}} = M_{\text{SiO}} (R_{15_i} + R_{17_i} + R_{18_i} - R_{19_i})$
CH <sub>4</sub>	$S_{\text{CH}_4} = M_{\text{CH}_4} (-R_{20_i} - R_{21_i})$
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	$S_{\text{C}_2\text{H}_6} = M_{\text{C}_2\text{H}_6} (-R_{22_i} - R_{23_i})$
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	$S_{\text{C}_3\text{H}_8} = M_{\text{C}_3\text{H}_8} (-R_{24_i} - R_{25_i})$
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	$S_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = M_{\text{C}_4\text{H}_{10}} (-R_{26_i} - R_{27_i})$
Fe( <i>i</i> )	$S_{\text{Fe}(i)} = M_{\text{Fe}(i)} (wR_{3_i} + wR_{6_i} - R_{28_i})$
Fe <sub>w</sub> O( <i>i</i> )	$S_{\text{Fe}_w\text{O}(i)} = M_{\text{Fe}_w\text{O}(i)} \left( \frac{3}{4w-3} R_{2_i} + \frac{3}{4w-3} R_{5_i} - R_{29_i} \right)$
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ( <i>i</i> )	$S_{\text{Fe}_3\text{O}_4(i)} = M_{\text{Fe}_3\text{O}_4(i)} \left( -\frac{w}{4w-3} R_{2_i} - \frac{w}{4w-3} R_{5_i} + R_{1_i} + R_{4_i} \right)$
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ( <i>i</i> )	$S_{\text{Fe}_2\text{O}_3(i)} = M_{\text{Fe}_2\text{O}_3(i)} (-R_{1_i} - R_{4_i})$
SiO <sub>2</sub> ( <i>i</i> )	$S_{\text{SiO}_2(i)} = M_{\text{SiO}_2(i)} (-R_{15_i} - R_{16_i} - R_{30_i})$
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ( <i>i</i> )	$S_{\text{Al}_2\text{O}_3(i)} = -M_{\text{Al}_2\text{O}_3(i)} R_{31_i}$
CaO( <i>i</i> )	$S_{\text{CaO}(i)} = -M_{\text{CaO}(i)} R_{32_i}$





### BAB III METODOLOGI

Species	Persamaan Fraksi Massa
$MgO(i)$	$S_{MgO(i)} = -M_{MgO(i)} R_{33i}$
$H_2O(i)$	$S_{H_2O(i)} = -M_{H_2O(i)} R_{37i}$
$C_{(coke)}$	$S_{C_{(coke)}} = M_C (-R_8 - R_9 - R_{10} - R_{11} - R_{15} - 3R_{16} + 2R_{17} - R_{18} - R_{19} - R_{36})$
$C_{(pc)}$	$S_{C_{(pc)}} = M_C (-R_8 - R_9 - R_{10} - R_{11})$
$VM_{(pc)}$	$S_{VM_{(pc)}} = M_{VM} (-R_{13} - R_{14})$
$SiC_{(coke)}$	$S_{SiC_{(coke)}} = M_{SiC_{(coke)}} (R_{16} - R_{17})$
$gangue(i)$	$S_{gangue(i)} = -M_{gangue(i)} R_{35i}$
$(i = \text{ore, sinter, pelet, coke, arang, dan powder})$	
$Fe_{(hm)}$	$S_{Fe} = M_{Fe} (R_{28i} + R_{34})$
$C_{(hm)}$	$S_C = M_C (R_{36} - R_{19})$
$Si_{(hm)}$	$S_{Si} = M_{Si} (R_{19} + R_{34})$
$CaO_{(slag)}$	$M_{CaO} R_{32i}$
$SiO_{2(slag)}$	$M_{SiO_2} (R_{30i} - R_{18})$
$Al_2O_{3(slag)}$	$M_{Al_2O_3} R_{31i}$
$MgO_{(slag)}$	$M_{MgO} R_{33i}$
$Fe_wO_{(slag)}$	$M_{Fe_wO} (R_{29i} - R_{7i})$
$Gangue_{(slag)}$	$M_{gangue} R_{35i}$

Tabel 3.16 Berat molekuler [kg/kmol] (Castro,2000)

$M_{Fe}$	55,85	$M_H$	1,008	$M_{Mg}$	24,31
$M_O$	16	$M_C$	12,01	$M_{Al}$	26,98
$M_N$	14,01	$M_{Si}$	28,09	$M_{Ca}$	40,08

## **BAB IV**

### **ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN**

#### **4.1 Validasi Pemodelan MBF**

Penelitian kali ini menggunakan program pemodelan yang telah dibuat oleh peneliti dari *Institute of Multi-disciplinary Research for Advanced Material* dari Universitas Tohoku Jepang. Program yang dibuat untuk penelitian *blast furnace* di Jepang ini diberi kode BF65 Model. Program pemodelan ini telah dilakukan validasi sebelumnya oleh Castro (Castro, 2000) dan Sungging (Sungging, 2005) dengan menggunakan validasi temperatur yang diukur menggunakan termokopel. Dalam validasi pemodelan ini akan dilakukan dengan cara membandingkan hasil perhitungan secara pemodelan dengan data eksperimental. Validasi data yang akan dilakukan pada distribusi temperatur dan data operasional MBF *Anyang Steel*. Data eksperimen untuk distribusi temperatur diperoleh dari penelitian yang dilakukan oleh Sungging dan Nogami (Sungging, 2005). Sedangkan data eksperimen untuk validasi data operasional diperoleh dari data operasi MBF *Anyang Steel*.

##### **4.1.1 Validasi Program BF65 Model dengan Data Distribusi Temperatur Penelitian Sungging, H. Nogami, J.I. Yagi**

Pada program yang digunakan memiliki masukan berupa data geometri, *material balance*, *material properties* dan juga data operasi, dimana masukan data tersebut dapat diubah sesuai model *blast furnace* yang digunakan. Pada penelitian yang dilakukan oleh Sungging dan Nogami (Sungging, 2005) model yang digunakan yaitu *blast furnace* dengan ukuran *working volume* sebesar 4550 m<sup>3</sup>. Pada penelitian ini dilakukan validasi program dengan membandingkan data distribusi temperatur dari hasil perhitungan secara pemodelan dengan data eksperimental yang telah dilakukan peneliti sebelumnya (Castro, 2000) dan (Sungging, 2005). Pada Tabel 4.1 merupakan parameter operasi yang di gunakan dalam *blast furnace* 4550 m<sup>3</sup>.



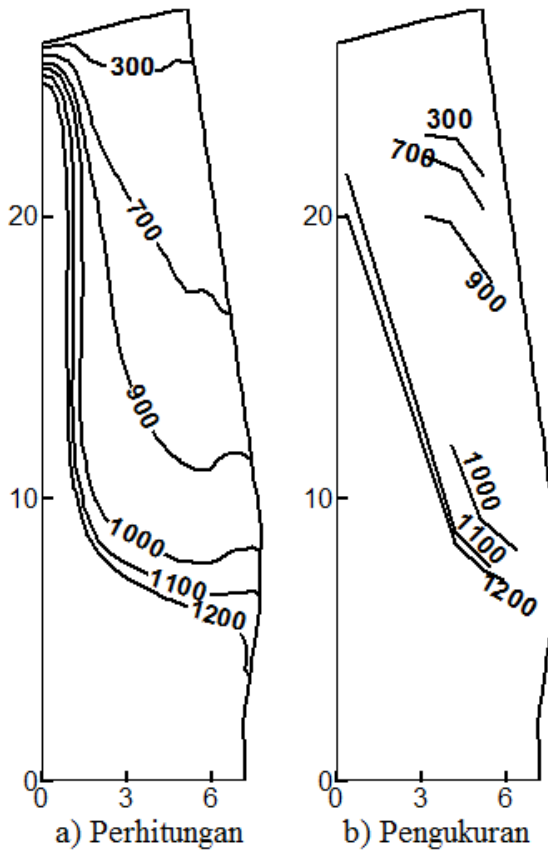
## BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

---

Tabel 4.1 Parameter operasi *blast furnace* 4550 m<sup>3</sup>  
(Sungging, 2005)

Parameter	Unit	Nilai
Tekanan Gas Pada Bagian atas	atm	2,64
Produktifitas	kg/s	106,6
Oksigen (O <sub>2</sub> )	%	3
Effisiensi pembakaran	%	73
Kecepatan umpan serbuk reduktor	Kg/s	200
Ukuran diameter Serbuk reduktor	m	10 <sup>-4</sup>

Hasil pemodelan pada penelitian (Sungging, 2005) dan (Castro, 2000) divalidasi dengan pengukuran distribusi temperatur pada *blast furnace* dengan menggunakan termokopel. Walaupun pada penelitian mereka menyebutkan validasi hanya dapat dilakukan pada temperatur maksimal 1200°C sedangkan temperatur di atas ini tidak dapat dilakukan pengukuran diameter karena keterbatasan peralatan ukur pada saat itu. Berikut ini hasil perbandingan distribusi temperatur secara pemodelan dengan distribusi temperatur eksperimental (Sungging, 2005).



Gambar 4.1 Perbandingan perhitungan dan pengukuran distribusi temperatur oleh Nogami dan Sungging [ $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ] (Sungging, 2005)

Dari Gambar 4.1 perbedaan perhitungan dan pengukuran temperatur memiliki pola distribusi dan besaran yang relatif sama. Pada hasil pengukuran temperatur di dapatkan area distribusi temperatur pada range 900 – 1000  $^{\circ}\text{C}$  memiliki luas area yang relatif besar dibanding yang lain, area ini disebut sebagai HTRZ (*High Temperatur Thermal Reserve Zone*), sedangkan pada



## BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

---

perhitungan didapatkan luas area yang lebih kecil. Luasan HTRZ dipengaruhi oleh permeabilitas dari bahan yang berada pada area tersebut, perbedaan luas antara perhitungan dan pengukuran temperatur kemungkinan besar dikarenakan perbedaan dari sifat permeabilitas material pada area ini. Hal ini karena nilai dari sifat material antara perhitungan dan pengukuran diameter terdapat perbedaan. Perbedaan ini dikarenakan ketidak homogenan sifat material yang ada pada keadaan eksperimental, karena akan sangat sulit melakukan homogenisasi bahan yang diumpankan pada *blast furnace*. Ketidakhomogenan yang dimaksud contohnya pada *blast furnace* digunakan material dengan ukuran diameter kokas dan juga bijih besi yang tidak sama (perbedaan ukurannya cukup signifikan) contohnya rentang ukuran kokas bervariasi dari 25 mm sampai 70 mm padahal pada pemodelan hanya digunakan diameter kokas  $48 \pm 4$  mm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa validasi dengan menggunakan data pengukuran temperatur dengan termokopel tersebut masih harus dilakukan validasi lebih lanjut dengan menggunakan data operasional MBF *Anyang Steel* dengan memperhatikan nilai error yang dihasilkan. Namun sebagai langkah awal, pemodifikasian program BF65 Model sudah bisa dilakukan dengan melihat validasi data temperatur tersebut.

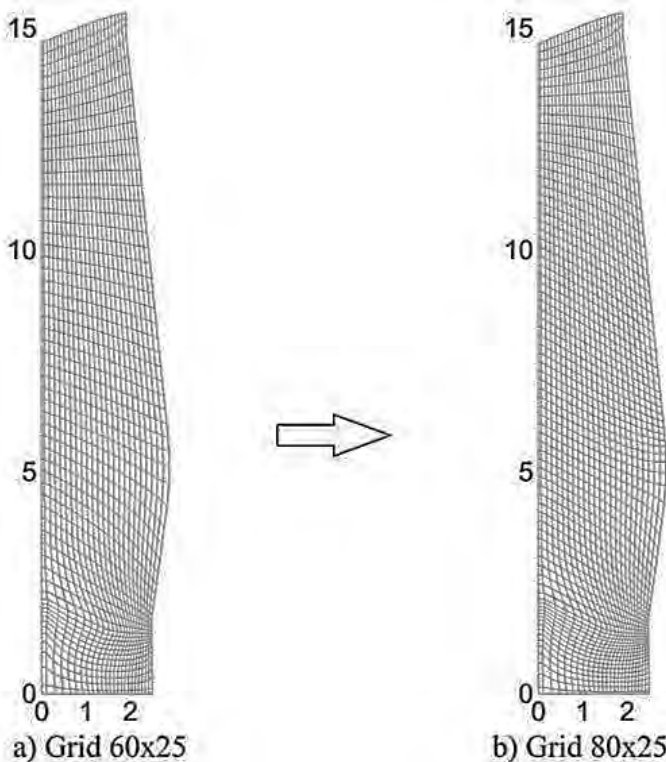
### **4.1.2 Validasi dengan Data Operasional dari MBF *Anyang Steel***

Pada penelitian saat ini program *blast furnace* tersebut dilakukan upaya *scaledown* dikarenakan kebutuhan penelitian di Indonesia yang membutuhkan pembelajaran fenomena yang terjadi di dalam MBF sebagaimana diketahui pengembangan MBF yang cocok untuk industri skala kecil sedang digencarkan untuk menambah tingkat perekonomian Indonesia dibidang pertambangan mineral. Adapun dalam penelitian ini digunakan data dari MBF Cina yaitu dari *Anyang Steel* dengan kapasitas *working volume* 300 m<sup>3</sup>. Pada proses pemasukan data teknis dalam program BF65 model terdapat hasil error dari data produksi yang cukup besar sehingga dalam program pemodelan dilakukan modifikasi sedemikian rupa agar validasi dapat diterima sehingga



## BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

fenomena MBF bisa diketahui. Dalam penelitian ini program BF65 dilakukan modifikasi dengan mengubah parameter grid dari grid awal yang digunakan pada penelitian sebelumnya yaitu 60x25 menjadi 80x25. Hal ini dikarenakan adanya perbedaan linearitas ketinggian dan jari-jari *blast furnace* yang digunakan pada penelitian sebelumnya dengan MBF milik *Anyang Steel*. Perbedaan proses *mesh* (metode untuk penyelesaian persamaan multidimensi / *finite volume method*) dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Perbedaan grid setelah modifikasi program [m]

Pada modifikasi *mesh* pada Gambar 4.2 terlihat bahwa grid yang ditampilkan pada grid yang baru lebih banyak dan mendekati



## BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

bentuk persegi sehingga pada penyelesaian solusinya tidak menghasilkan distorsi dan error yang besar dibandingkan dengan grid yang digunakan pada penelitian Sungging dan Nogami (Sungging, 2005).

Pada penelitian ini inputan data merujuk pada data operasi MBF *Anyang Steel*, sehingga dapat diketahui kevalidan dari proses pemodelan dengan membandingkan hasil perhitungan secara pemodelan dengan data operasi MBF *Anyang Steel*. Data operasi MBF *Anyang Steel* dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Parameter operasi MBF *Anyang Steel* (Pandey, 2001)

Parameter	Unit	Nilai
Laju Umpan <i>Burden Material</i>	kg/thm	1758
Laju Umpan <i>Flux/limestone</i>	kg/thm	35
Laju Umpan Kokas	kg/thm	510
Laju Umpan <i>Pulvurized Coal</i>	kg/thm	76
Temperatur <i>Blast</i>	°C	1100
Oksigen (O <sub>2</sub> )	%	1,2
<i>Blast Rate</i>	kg/thm	1739
Ukuran Kokas	mm	25-60 (48)

Dengan menggunakan parameter operasi yang sama, dilakukan perhitungan dengan menggunakan pemodelan. Hasil dari perbandingan perhitungan secara pemodelan dan data operasi MBF *Anyang Steel* dapat dilihat pada Tabel 4.3.



## BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Tabel 4.3 Perbandingan perhitungan dan pengukuran MBF  
*Anyang Steel*

Parameter Operasi	Unit	Hasil Pengukuran	Hasil Perhitungan Pemodelan	Error
Produktifitas	t/m <sup>3</sup> /d	2,611	2,613	0,1%
Laju Slag	kg/thm	524	519,88	0,78%
Laju Gas Buang	kg/thm	2594	2573,63	0,79%
Temperatur Gas Buang	°C	150	150,09	0,06%
Kandungan Si dalam Hot Metal	%	0.70	0,64	8%

Dari Tabel 4.3 dapat dilihat bahwa error maksimal yaitu 8%. Dengan menggunakan margin error sebesar 10% (Wonnacott, 1972) maka dapat disimpulkan bahwa program pemodelan hasil modifikasi BF65 Model untuk penelitian MBF *Anyang Steel* telah layak untuk digunakan.

### 4.2 Data Fenomena Fisik MBF dengan Variabel Diameter Kokas

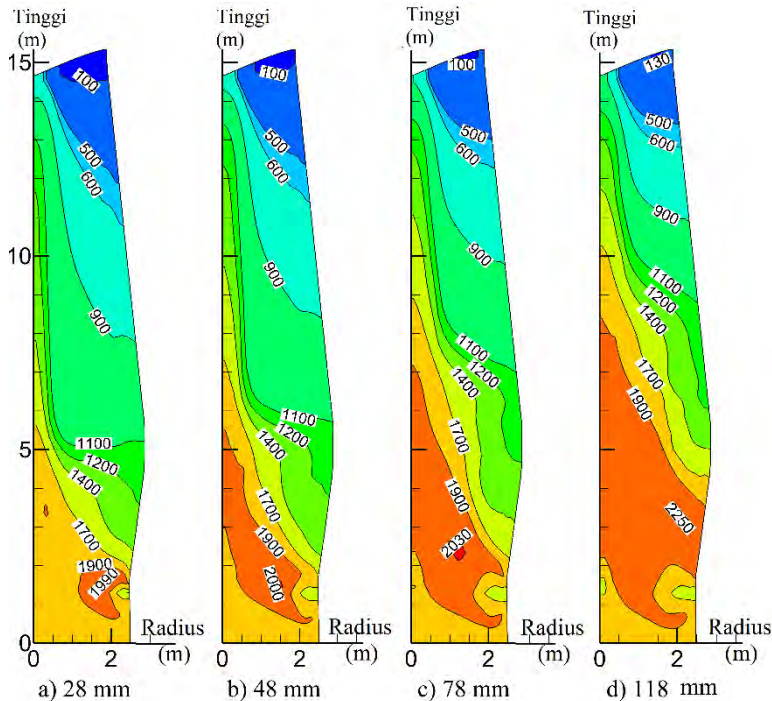
Dalam penelitian kali ini akan dibahas mengenai pengaruh variabel diameter kokas terhadap fenomena MBF. Diameter kokas memiliki pengaruh terhadap luas area yang bereaksi dengan gas membentuk gas reduktor dan juga berpengaruh terhadap besarnya fraksi *voidage* dan kokas sehingga membuat konsentrasi temperatur yang tinggi pada daerah sekitar *raceway*. Juga berpengaruh terhadap besarnya *pressure drop* sehingga akan dicari data distribusi temperatur, distribusi tekanan dan data fraksi gas CO dan CO<sub>2</sub>.





## BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

### 4.2.1 Perbandingan Distribusi Temperatur



Gambar 4.3 Pengaruh diameter kokas terhadap distribusi temperatur [°C]

Pada Gambar 4.3 menunjukkan hasil visualisasi data perhitungan temperatur oleh program pemodelan dengan mengubah variabel diameter kokas. Seiring penambahan ukuran kokas terlihat semakin tingginya temperatur gas maksimal MBF dan semakin luasnya daerah distribusi temperatur tinggi namun penurunan luas daerah distribusi temperatur rendah dimana terjadi reaksi reduksi magnetit dan wustit (Geerdes, 2009). Hal ini sesuai dengan teori pada persamaan 2.9 yaitu pada ukuran diameter yang lebih besar, akan terjadi *pressure drop* yang kecil. *Pressure drop*



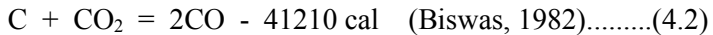
## BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

---

yang kecil ini berefek pada kecepatan aliran gas yang meningkat (Biswas, 1982) sehingga kemungkinan terjadi proses *solutions loss* (reaksi pembentukan gas CO oleh reaksi CO<sub>2</sub> dengan kokas) akan semakin kecil karena gas CO<sub>2</sub> yang dihasilkan dari kokas belum sempat bereaksi dengan C yang berasal dari kokas membentuk CO.



Reaksi ini merupakan reaksi pembakaran kokas dimana merupakan reaksi eksotermik sehingga menghasilkan panas. Pada tekanan reaksi tertentu gas CO<sub>2</sub> yang dihasilkan akan bereaksi sesuai kesetimbangan reaksi

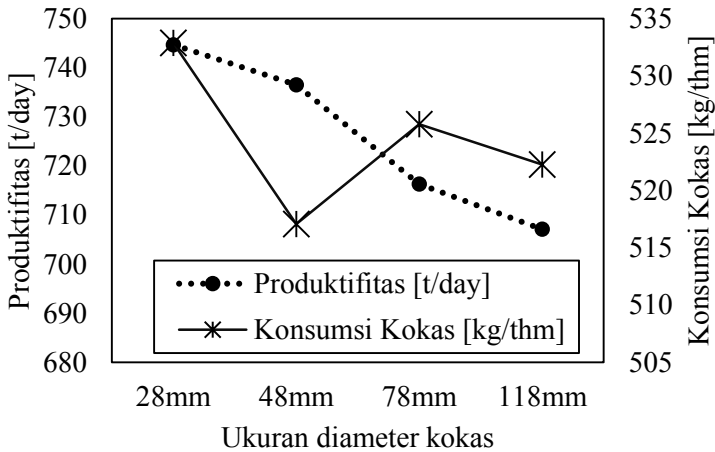


Reaksi tersebut merupakan reaksi endotermik (*solution loss*) yang membutuhkan panas sehingga akan mengkonsumsi panas yang dihasilkan oleh reaksi pembakaran kokas. Reaksi ini terjadi jika berada dalam tekanan parsial tertentu (Biswas, 1982). Namun pada ukuran kokas lebih besar tekanan yang terperangkap dalam *voidage* kokas akan mengecil sehingga tekanan tidak cukup mengakomodir terjadinya reaksi *solution loss*.

Tanpa reaksi endotermik ini maka temperatur tetap akan meningkat sehingga temperatur maksimal meningkat. Adanya peningkatan temperatur ini akan berefek pada daerah HTRZ yang mana merupakan daerah *ore* mulai mencair. Karena gas CO yang terbentuk sedikit maka kecepatan reaksi akan semakin menurun dan menyebabkan produktifitas menurun. Hal ini dapat dilihat pada hasil perbedaan produktifitas dari data perhitungan program pemodelan Gambar 4.4.



## BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



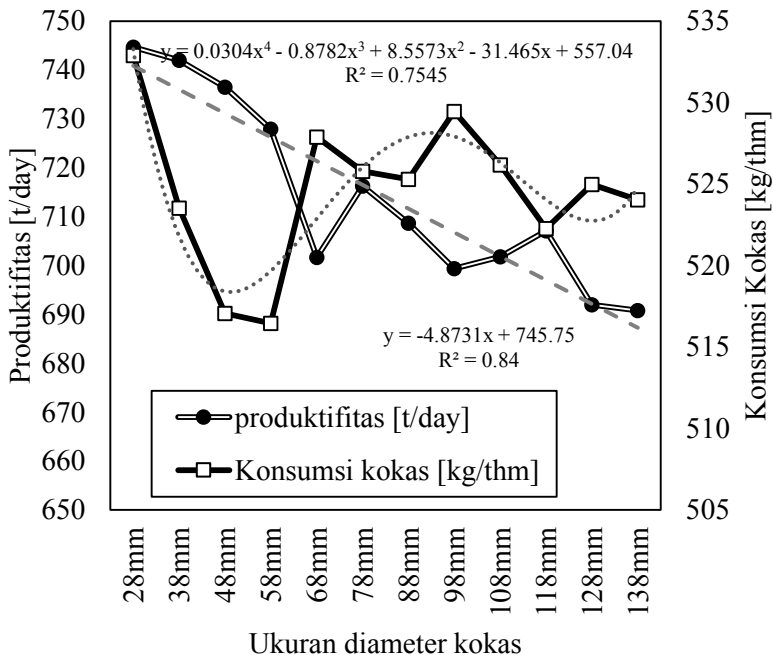
Gambar 4.4 Grafik pengaruh diameter kokas terhadap produktifitas dan konsumsi kokas

Pada grafik Gambar 4.4 terlihat pada penambahan ukuran diameter kokas produktifitas menurun namun konsumsi kokas memiliki nilai minimum pada ukuran diameter 48 mm. Hal ini dikarenakan pada diameter terkecil 28 mm kecepatan reaksi pembakaran kokas meningkat disebabkan luas area kokas yang bereaksi besar. Gas reduktor yang dihasilkan semakin besar namun temperatur dalam *blast furnace* menurun sehingga daerah kohesif juga makin turun dan semakin mengecil. Hal ini menyebabkan dibutuhkan kokas lebih untuk melelehkan *ore* sehingga laju kokas tinggi namun tidak diimbangi dengan produktifitas yang linear seperti pada diameter 48 mm. Sehingga konsekuensinya jumlah gas buang akan lebih banyak terbuang. Namun seiring bertambahnya ukuran kokas sampai 48 mm temperatur juga semakin meningkat sehingga daerah kohesif membesar dan laju produktifitas juga menurun namun dengan penurunan yang tidak signifikan konsumsi kokas. Pada produktifitas terjadi penurunan dengan semakin besar ukuran kokas. Hal ini dikarenakan pada ukuran kokas yang lebih besar luas area kokas yang bereaksi akan



## BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

semakin kecil (sesuai permodelan pada persamaan 2.29, 2.34, 2.36-2.38) sehingga kecepatan reduksi akan semakin menurun. Perbandingan produktifitas dan konsumsi kokas dengan berbagai variasi diameter untuk melihat tren telah dilakukan dengan hasil seperti pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 *Trenline* pengaruh diameter kokas terhadap produktifitas dan konsumsi kokas

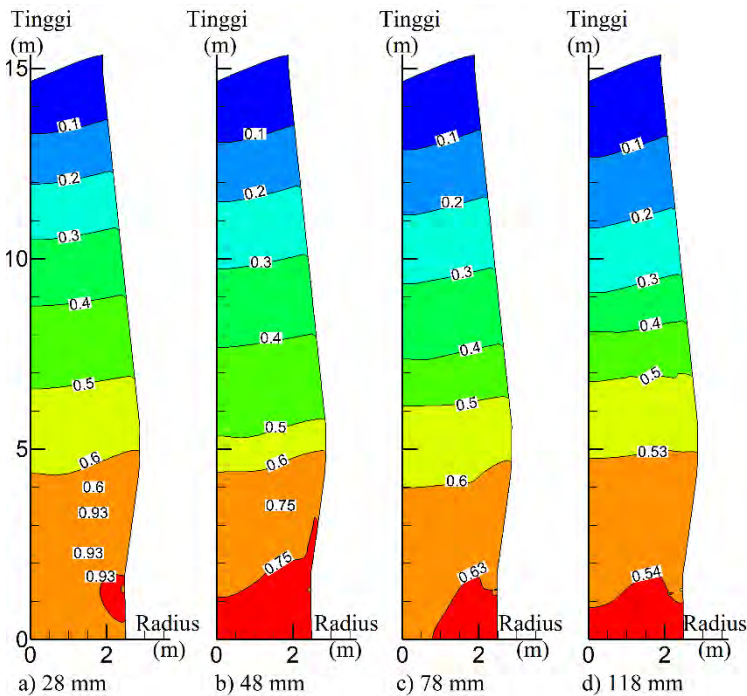
Tren menunjukkan produktifitas semakin menurun namun konsumsi kokas fluktuatif dengan nilai minimum yaitu pada diameter 58 mm. Pada grafik terlihat bahwa produktivitas tertinggi namun dengan konsumsi kokas yang cukup kecil berada pada penggunaan ukuran diameter kokas sebesar 48 mm.



## BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Pada grafik konsumsi kokas terlihat setelah ukuran 58 mm nilainya semakin meningkat dengan fluktuasi nilai. Hal ini karena walaupun dengan temperatur tinggi yang cukup untuk melelehkan hasil reduksi *ore* namun dikarenakan jumlah gas CO yang terbentuk tidak banyak sehingga laju pembentukan *hot metal* menjadi lambat dan sebagiannya lebih menjadi slag.

### 4.2.2 Perbandingan Distribusi Tekanan



Gambar 4.6 Pengaruh diameter kokas terhadap distribusi perbedaan tekanan [atm]

Dari Gambar 4.6 terlihat perbedaan distribusi tekanan pada berbagai variasi diameter kokas. Pada ukuran kokas 28 mm



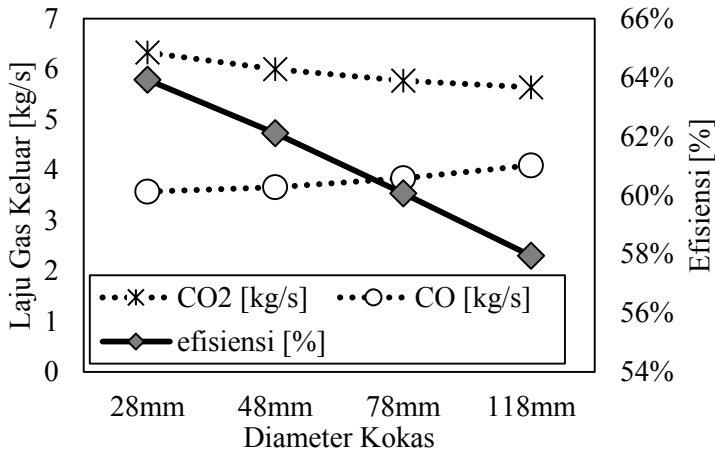
## BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

---

*pressure drop* yang terjadi paling besar sesuai pada persamaan 2.9 karena pada diameter kecil *voidage* yang ada pada daerah didepan *raceway* paling kecil sehingga timbul gaya tahan untuk aliran udara dalam melewati rongga kokas. Gaya tahan ini menyebabkan terjadinya *residence time* (waktu kontak udara dengan kokas yang semakin lama) semakin besar sehingga mempercepat terjadinya reaksi *solutions loss* (pembentukan gas reduktor CO). Pada diameter yang lebih besar terjadi penurunan *pressure drop* yang berdampak pada semakin luasnya daerah dengan nilai tekanan yang relatif sama. Hal ini dikarenakan fraksi *voidage* yang cukup besar dikarenakan besarnya ukuran kokas sehingga aliran udara mengalir dengan lancar dan waktu kontak semakin kecil. Hal ini menyebabkan tahapan reaksi pembakaran terjadi terus menerus sedangkan tahapan reaksi pembentukan gas CO terjadi sangat kecil sehingga temperatur di daerah kokas meningkat drastis. Pada diameter lebih besar waktu kontak dan pembentukan gas CO lebih banyak terjadi pada daerah kohesif dimana temperatur berkisar 900-1100 °C yang dikarenakan peningkatan temperatur menyebabkan zona kohesif ini berada pada daerah yang lebih tinggi. Perhitungan *pressure drop* telah dimasukkan dalam perhitungan dalam bentuk persamaan ergun pada persamaan 2.10 Peningkatan penggunaan gas reduktor dapat dilihat efisiensinya pada Gambar 4.7.



## BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

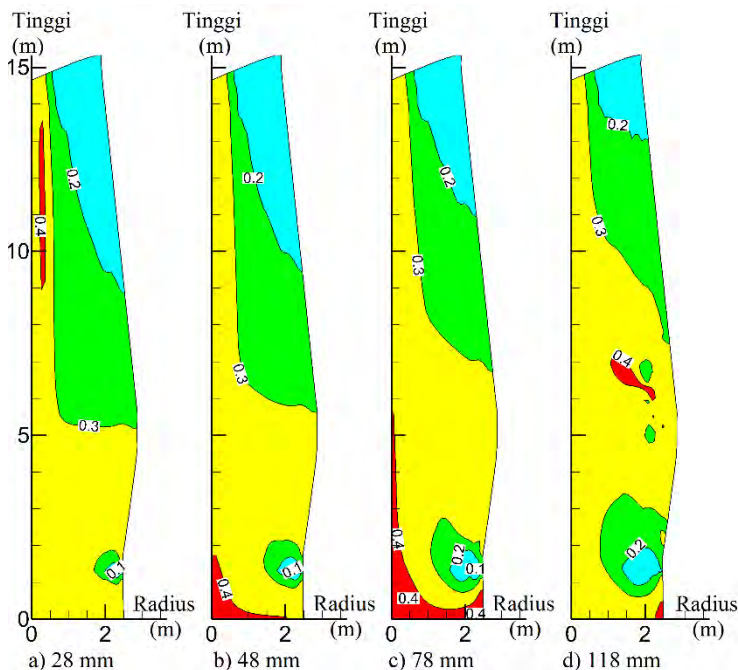


Gambar 4.7 Grafik pengaruh diameter kokas terhadap efisiensi dan laju gas CO keluar

Dikarenakan waktu tahan (*residence time*) *blast* di kokas sedikit maka kecepatan *blast* ketika melewati daerah susunan kokas masih cukup cepat sehingga ketika melewati daerah *ore* akan ada gas CO yang *loss* akibat masih cepatnya aliran gas sehingga gas CO<sub>2</sub> yang dihasilkan semakin menurun. Hal ini menyebabkan efisiensi berdasarkan perbandingan jumlah gas keluar CO dan CO<sub>2</sub> semakin menurun seiring bertambahnya ukuran kokas. Hal ini juga ter jelaskan dalam konsumsi kokas yang semakin meningkat (Gambar 4.4) namun pada diameter 28 mm konsumsi kokas juga meningkat tetapi dikarenakan temperatur yang rendah maka pembakaran kokas lebih banyak dibutuhkan untuk melelehkan *ore* yang sudah tereduksi.



## BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



Gambar 4.8 Pengaruh diameter kokas terhadap distribusi gas CO [%]

Gambar 4.8 merupakan distribusi fraksi gas CO. Seiring peningkatan ukuran diameter kokas maka pada kondisi *steady state* posisi kokas di dalam *blast furnace* semakin meninggi. Hal ini dikarenakan pada diameter lebih besar kereaktifannya membentuk gas CO semakin kecil seperti dijelaskan pada analisa 4.2.1. Hal ini menyebabkan lapisan kokas belum habis namun lapisan *ore* telah habis dikarenakan temperatur tinggi telah melelehkan *ore*. Pada ukuran diameter 28 mm konsentrasi CO tertinggi memiliki nilai terbesar di daerah depan tuyser. Hal ini dikarenakan kereaktifan kokas dan gas  $\text{CO}_2$  membentuk gas CO semakin tinggi karena *residence time* dan tekanan parsialnya semakin tinggi. Seiring dengan pertambahan ukuran kokas daerah konsentrasi tinggi gas

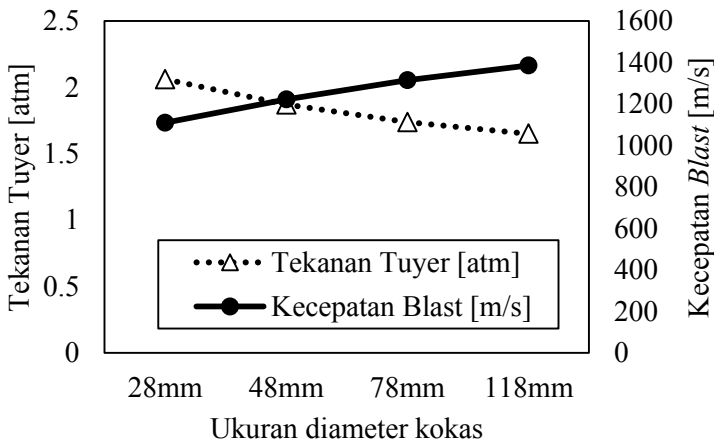




## BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

CO didepan tuyer semakin menurun namun pada diameter 118 mm terjadi peningkatan gas CO pada posisi dekat dari daerah kohesif. Hal ini menjelaskan penurunan konsumsi kokas pada diameter 118 mm (Gambar 4.4).

Pada distribusi gas CO diatas terlihat bahwa pada ukuran diameter yang semakin besar, fraksi CO dengan nilai yang kecil yang terdapat di depan tuyer semakin membesar. Hal ini disebabkan pada diameter lebih besar tekanan di tuyer menjadi lebih kecil dan laju *blast* semakin cepat melewati *voidage*. Pada tahap tersebut terjadinya reaksi *combustion* dari kokas sehingga pembentukan CO baru banyak terjadi pada jarak dari tuyer yang cukup jauh. Dapat dilihat perbandingan kecepatan *blast* dan tekanan tuyer dari berbagai variasi diameter kokas pada Gambar 4.9.



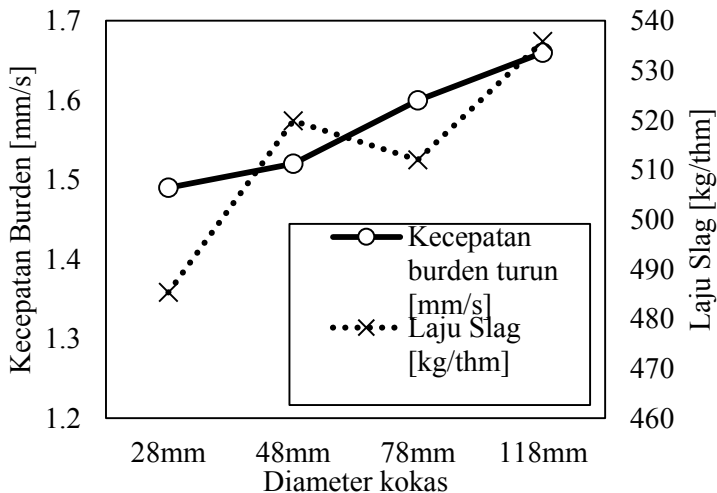
Gambar 4.9 Grafik pengaruh ukuran kokas terhadap tekanan tuyer dan kecepatan *blast*

Pada diagram Gambar 4.9 terlihat bahwa semakin besar diameter kokas maka kecepatan *blast* makin tinggi namun tekanan tuyer semakin kecil. Hal ini akan menyebabkan terjadinya peningkatan kecepatan reaksi / kontak antara *blast* dan kokas



## BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

sehingga terjadi proses *combustion* yang cepat dan juga reaksi penggerusan kokas oleh *blast* disebabkan oleh cepatnya aliran gas melewati kokas. Hal ini juga sesuai pada persamaan 2.11 ergun (Sungging, 2005) dimana pada fraksi volume gas (*voidage*) semakin besar maka momentum gas ke solid (kecepatan reaksi / kontak semakin besar. Fraksi volume gas ini ditentukan oleh besarnya diameter kokas. Jika mempertimbangkan hal ini maka akan terjadi percepatan penggunaan kokas (peningkatan konsumsi kokas seperti tercantum pada Gambar 4.4) yang mana akan mempercepat laju turunnya *burden material*. Laju turunnya *burden material* yang semakin cepat ini juga disebabkan karena nilai temperatur dalam MBF yang semakin besar sesuai pada pembahasan 4.2.1 mengenai peningkatan temperatur maksimal MBF sehingga melelehkan lebih banyak *ore* menjadi slag. Dapat dilihat pada grafik perbedaan laju slag dan kecepatan *burden* pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Grafik pengaruh ukuran kokas terhadap kecepatan *burden* dan laju slag



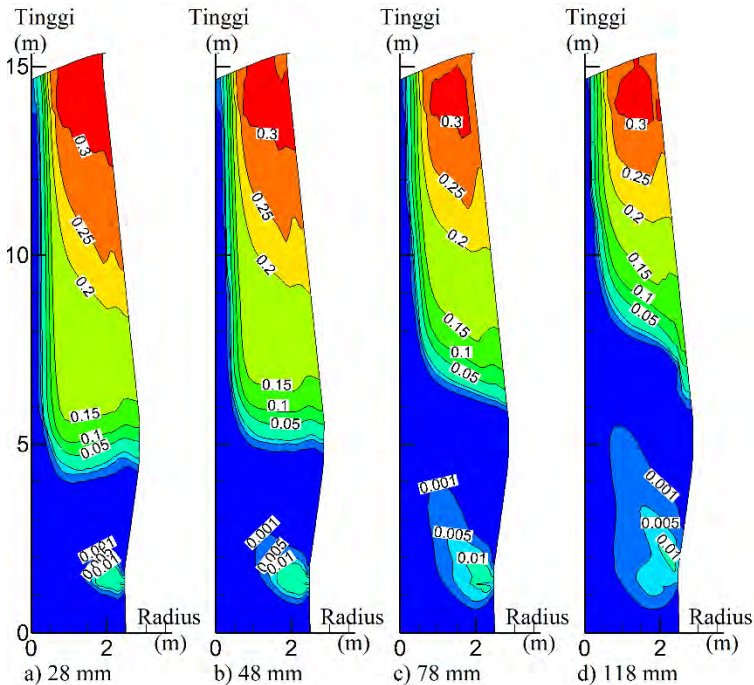
## BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

---

Pada grafik Gambar 4.10 terjadi penurunan laju slag pada diameter 78 mm. Hal ini disebabkan rendahnya produktifitas setelah diameter 48 mm sehingga laju slag diameter 78 mm menurun dibandingkan diameter 48 mm namun setelah itu laju slag dan kecepatan *burden* kembali linear. Peningkatan kecepatan *burden* seiring bertambahnya ukuran kokas terjadi juga dikarenakan pada diameter kokas yang lebih besar akan berdampak pada fraksi *voidage* yang makin besar. Ketika terjadi proses gasifikasi pengurangan massa kokas terjadi cepat namun jumlah massa kokas yang masuk dalam MBF sedikit. Hal ini dikarenakan pada batasan *working volume* banyak rongga (*voidage*) yang tercipta sehingga mengurangi volume kokas yang masuk.



## BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



Gambar 4.11 Pengaruh diameter kokas terhadap distribusi gas  $\text{CO}_2$  [%]

Pada Gambar 4.11 terlihat bahwa gas  $\text{CO}_2$  yang terbentuk di depan tuyer daerah distribusinya semakin meluas seiring bertambahnya ukuran kokas. Terlihat juga distribusi gas  $\text{CO}_2$  dengan konsentrasi tinggi yang terbentuk setelah daerah kohesif semakin mengecil seiring bertambahnya diameter kokas. Hal ini menandakan semakin banyaknya jumlah kokas yang masih berada dalam zona kokas aktif disebabkan oleh *residence time* kokas yang lama karena ukurannya yang besar.



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## LAMPIRAN

### NOMENKLATUR

$A_i$ :	Permukaan dari material solid	[m <sup>2</sup> ]
$A_{i-j}$ :	Kontak area antara fase $i$ dan $j$	[m <sup>2</sup> ]
$a_j$ :	Koeffisien Persamaan $C_p$	[J/kg.K]
$b_j$ :	Koeffisien Persamaan $C_p$	[J/kg.K <sup>2</sup> ]
$C_{d_{i-j}}$ :	Koeffisien Drag antara fase $i$ dan $j$	[-]
$C_{P,j}$ :	<i>Specific heat</i>	[J/kg.K]
$c_j$ :	Koeffisien Persamaan $C_p$	
$D^*$ :	Diameter Hidrolik	[m]
$d_i$ :	diameter for fase $i$	[m]
$\dot{E}_{i-j}$ :	Perpindahan Panas Konveksi antara fase $i$ dan $j$	[W/m <sup>3</sup> ]
$e_i$ :	Emisifitas fase $i$	[-]
$\vec{F}_i^j$ :	Tranfer momentum antara fase $i$ dan $j$	[N/m <sup>3</sup> ]
$f_m$ :	Fraksi Volume komponen m pada fase solid	[-]
$Fr_{i-j}$ :	<i>Froude number</i> untuk fase $i$ dan $j$	[-]
$\vec{g}$ :	Vektor gravitasi	[m/s <sup>2</sup> ]
$H_i$ :	Entalpi	[J/kg]
$\Delta H_{i,j}^T$ :	Panas Pembentukan dari spesies $j$ fase $i$ pada temperatur $T$	[J/kg]
$h_{i-j}$ :	Koeffisien konveksi antara fase $i$ dan $j$	[W/m <sup>2</sup> .K]
$k_{\text{Boltzman}}$ :	Konstanta Boltzman	[J/K]
$k_i$ :	Konduktivitas termal fase $i$	[W/m.K]
$M_j$ :	Berat molecular spesies $j$	[kg/kmol]

$P_i$ :	Tekanan fase $i$	[Pa]
$Pe_{i-j}$ :	Peclet number untuk fase $i$ dan $j$	[-]
$Pr_{i-j}$ :	Prandtl number untuk fase $i$ dan $j$	[-]
$R$ :	Konstanta Gas	[J/kmol.K]
$R_n$ :	Laju Reaksi $n$	[kmol/m <sup>3</sup> s]
$Re_{i-j}$ :	Reynolds number untuk fase $i$ dan $j$	[-]
$Sc_i$ :	Schmidt number untuk fase $i$	[-]
$S_\phi$ :	Source term in Eq. (2.1)	
$T_i$ :	Temperatur untuk fase $i$	[K]
$\vec{U}_i$ :	Vektor kecepatan untuk fase $i$	[m/s]
$W_{i-j}$ :	Weber number untuk fase $i$ dan $j$	[-]
$w$ :	Parameter Stokiometri Wustite	[-]
$y_{i,j}$ :	Fraksi mol untuk fase $i$ dan $j$	[-]

### Simbol

$\Gamma_\phi$ :	Koeffisien Transfer persamaan 1	
$\varepsilon_i$ :	Fraksi Volume fase $i$	[-]
$\in_j$ :	Karakteristik Energi pada spesies $j$	[J]
$\theta$ :	Sudut Inclination layer	[radians]
$\theta_{i-j}$ :	Sudut Kontak antara fase $i$ dan $j$	[radians]
$\rho_i$ :	Berat Jenis fase $i$	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\phi_i$ :	Variabel bebas persamaan 1	
$\varphi_i$ :	Faktor Bentuk fase $i$	[-]

## HASIL PERHITUNGAN PROGRAM

Perhitungan *mass balance* ukuran diameter kokas 28 mm

BF65 results using the CHEMISTRY model after 10000 iterations.

```
=====
Burden (specified) 25.00C 298.15K
Blast (specified) 1100.00C 1373.15K
PC (specified) 1100.00C 1373.15K
FO/flux (specified) 1100.00C 1373.15K
```

```
Hot metal (calculated) 1820.21C 2093.36K
Hot slag (calculated) 1821.43C 2094.58K
Top gas (calculated) 112.79C 385.94K
Top PC char (calculated) 112.85C 386.00K
Top FO/flux (calculated) 112.85C 386.00K
```

```
Rwy max. gas (calculated) 1994.91C 2268.06K
Rwy max. solid (calculated) 1932.24C 2205.39K
Ex-rwy gas (calculated) 1900.34C 2173.49K
```

Miscellaneous

```
=====
Top gas pressure 1.137 atm (specified)
Tuyere pressure 2.061 atm (calculated)
Pressure drop 0.924 atm (calculated)
Blast velocity 1109.6 m/s
Burden velocity 1.49 mm/s
Coke rate 532.9 kg/thm
PC rate 79.4 kg/thm
NG rate 0.0 kg/thm
Fuel rate 612.3 kg/thm
ENRICHMENT = -1.01357491715888
```

Summed reaction rates (kg/s)

```
=====
CO g In : 0.00 Out : 3.57 Error: -0.02 Error/(In+Gen.): -0.26%
    ICHO : -0.56 ICMO : -0.88 ICWO : -2.67 ICHX : 0.00 ICMX : 0.00
    ICWX : 0.00 IO1C : 4.84 IO1F : 0.35 IOCO : 0.00 ISLC : 2.80
    ISLF : 0.00 IWGC : 0.44 IWGF : 0.00 IDR : 0.16 IWS : -1.19
    IVS : 0.06 IQC : 0.13 IQM : -0.05 ICS : -0.06 IQSR : 0.09
    ISI : 0.10 IC10 : 0.00 IC1C : 0.00 IC20 : 0.00 IC2C : 0.00
    IC30 : 0.00 IC3C : 0.00 IC40 : 0.00 IC4C : 0.00
CO2 g In : 0.00 Out : 6.33 Error: -0.01 Error/(In+Gen.): -0.15%
    ICHO : 0.87 ICMO : 1.38 ICWO : 4.20 ICHX : 0.00 ICMX : 0.00
    ICWX : 0.00 IO2C : 0.06 IO2F : 0.01 IOCO : 0.00 ISLC : -2.20
    ISLF : 0.00 IWS : 1.87 ICV : 0.17 IVS : -0.04 IC1C : 0.00
    IC2C : 0.00 IC3C : 0.00 IC4C : 0.00
H2 g In : 0.00 Out : 0.02 Error: 0.00 Error/(In+Gen.): 0.07%
    IHHO : 0.00 IHMO : -0.01 IHWO : -0.10 IHX : 0.00 IHMX : 0.00
    IHWX : 0.00 IOH2 : 0.00 IWGC : 0.03 IWGF : 0.00 IWS : 0.09
    IVS : 0.01 IC10 : 0.00 IC1C : 0.00 IC20 : 0.00 IC2C : 0.00
    IC30 : 0.00 IC3C : 0.00 IC40 : 0.00 IC4C : 0.00
```



H2O	g	In :	0.01	Out :	1.19	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.04%
		IHHO :	0.00	IHMO :	0.07	IHOW :	0.90	IHHX :	0.00
		IHWX :	0.00	IEVO :	0.71	IEVC :	0.36	IOH2 :	0.00
		IWGF :	0.00	IWS :	-0.76	ICV :	0.20	IWGC :	-0.28
O2	g	In :	3.29	Out :	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.11%
		IO1C :	-2.76	IO2C :	-0.04	IO1F :	-0.20	IO2F :	0.00
		IOH2 :	0.00	ICV :	-0.28	IC10 :	0.00	IC20 :	0.00
		IC40 :	0.00					IC30 :	0.00
N2	g	In :	11.51	Out :	10.99	Error:	0.53	Error/(In+Gen.):	4.64%
		ICV :	0.01	IVS :	0.00				
SiO	g	In :	0.00	Out :	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.67%
		IQM :	-0.08	ICS :	0.10	IQSR :	0.14	ISI :	-0.16
CH4	g	In :	0.00	Out :	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		IC10 :	0.00	IC1C :	0.00				
C2H6	g	In :	0.00	Out :	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		IC20 :	0.00	IC2C :	0.00				
C3H8	g	In :	0.00	Out :	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		IC30 :	0.00	IC3C :	0.00				
C4H10	g	In :	0.00	Out :	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		IC40 :	0.00	IC4C :	0.00				
C	c	In :	3.56	Out :	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.11%
		ICD :	-0.56	IO1C :	-2.07	IO2C :	-0.02	ISLC :	-0.60
		IDR :	-0.07	IQC :	-0.08	IQM :	0.02	ICS :	0.05
SiC	c	In :	0.00	Out :	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.93%
		IQC :	0.09	ICS :	-0.09				
Fe2O3	o	In :	9.69	Out :	0.00	Error:	0.16	Error/(In+Gen.):	1.66%
		ICHO :	-9.52	IHHO :	0.00				
Fe3O4	o	In :	0.31	Out :	0.00	Error:	-0.13	Error/(In+Gen.):	-1.39%
		ICHO :	9.21	ICMO :	-8.62	IHHO :	0.00	IHMO :	-1.02
FexO	o	In :	1.52	Out :	0.00	Error:	0.15	Error/(In+Gen.):	1.37%
		ICMO :	8.12	ICWO :	-6.59	IHMO :	0.97	IHOW :	-3.45
Fe	o	In :	0.00	Out :	0.00	Error:	-0.06	Error/(In+Gen.):	-0.76%
		ICWO :	5.06	IHOW :	2.65	IMIO :	-7.77		
H2O	o	In :	0.71	Out :	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.03%
		IEVO :	-0.71						
Slag	o	In :	0.00	Out :	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		IMGO :	0.00						
SiO2	o	In :	1.51	Out :	0.00	Error:	0.01	Error/(In+Gen.):	0.95%
		IMSO :	-1.50						
H2O	c	In :	0.36	Out :	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.02%
		IEVC :	-0.36						
Ash	c	In :	0.00	Out :	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		IMGC :	0.00						
SiO2	c	In :	0.05	Out :	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-1.93%
		IMSC :	-0.02	IQC :	-0.14	IQM :	0.11		
Al2O3	o	In :	0.05	Out :	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.24%
		IMAO :	-0.05						
MgO	o	In :	0.41	Out :	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.86%
		IMMO :	-0.42						
CaO	o	In :	1.83	Out :	0.00	Error:	-0.01	Error/(In+Gen.):	-0.61%
		IMCO :	-1.84						

Al2O3c	In	:	0.58	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.01%
	IMAC	:	-0.58							
MgO	c In	:	0.01	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.62%
	IMMC	:	-0.01							
CaO	c In	:	0.04	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.37%
	IMCC	:	-0.04							
Fe	1 In	:	0.00	Out	:	8.00	Error:	0.07	Error/(In+Gen.):	0.91%
	IMIO	:	7.77	IMIX	:	0.00	IDR	:	0.31	
C	1 In	:	0.00	Out	:	0.52	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.52%
	ICD	:	0.56	ISI	:	-0.04				
Si	1 In	:	0.00	Out	:	0.10	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-1.43%
	ISI	:	0.10							
C	f In	:	0.50	Out	:	0.34	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.44%
	IO1F	:	-0.15	IO2F	:	0.00	ISLF	:	0.00	IWGF : 0.00
Volats	In	:	0.12	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.46%
	ICV	:	-0.10	IVS	:	-0.03				
Ash	f In	:	0.03	Out	:	0.00	Error:	0.03	Error/(In+Gen.):	100.00%
	IMGF	:	0.00							
SiO2	f In	:	0.04	Out	:	0.01	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.77%
	IMSF	:	-0.03							
Al2O3f	In	:	0.03	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.77%
	IMAF	:	-0.02							
MgO	f In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.77%
	IMMF	:	0.00							
CaO	f In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.77%
	IMCF	:	0.00							
Fe2O3x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
	ICHX	:	0.00	IHHX	:	0.00				
Fe3O4x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
	ICHX	:	0.00	ICMX	:	0.00	IHHX	:	0.00	IHMX : 0.00
FeO	x In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
	ICMX	:	0.00	ICWX	:	0.00	IHMX	:	0.00	IHWX : 0.00 IMWX : 0.00
Fe	x In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
	ICWX	:	0.00	IHWX	:	0.00	IMIX	:	0.00	
Slag	x In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
SiO2	x In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
Al2O3x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
MgO	x In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
CaO	x In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
FexO	1 In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.02	Error/(In+Gen.):	4.97%
	IMWO	:	0.42	IMWX	:	0.00	IDR	:	-0.40	
Slag	1 In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
	IMGO	:	0.00	IMGC	:	0.00	IMGF	:	0.00	
SiO2	1 In	:	0.00	Out	:	1.30	Error:	0.06	Error/(In+Gen.):	3.99%
	IMSO	:	1.50	IMSC	:	0.02	IMSF	:	0.03	IQSR : -0.18
Al2O31	In	:	0.00	Out	:	0.64	Error:	0.01	Error/(In+Gen.):	1.48%
	IMAO	:	0.05	IMAC	:	0.58	IMAF	:	0.02	
MgO	1 In	:	0.00	Out	:	0.42	Error:	0.01	Error/(In+Gen.):	3.14%
	IMMO	:	0.42	IMMC	:	0.01	IMMF	:	0.00	
CaO	1 In	:	0.00	Out	:	1.82	Error:	0.06	Error/(In+Gen.):	3.20%
	IMCO	:	1.84	IMCC	:	0.04	IMCF	:	0.00	

Fe2O3x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
	ICHX	:	0.00	IHHX	:	0.00				
Fe3O4x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
	ICHX	:	0.00	ICMX	:	0.00	IHHX	:	0.00	IHMx
FeO	x In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
	ICMX	:	0.00	ICWX	:	0.00	IHMx	:	0.00	IHWx
Fe	x In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
	ICWX	:	0.00	IHWx	:	0.00	IMIX	:	0.00	
Slag	x In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
SiO2	x In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
Al2O3x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
MgO	x In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
CaO	x In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%

Stream Analyses	Mass Rate	Mass Frac.	Mole Rate	Mole Frac.	Rate
=====	(kg/s)	(%)	(kmol/s)	(%)	(kg/thm)
Ore (in)	16.026	100.000	0.192	100.000	1859.284
Fe2O3o	9.686	60.440	0.061	31.617	1123.751
Fe3O4o	0.306	1.910	0.001	0.689	35.512
FexO o	1.519	9.480	0.022	11.468	176.260
H2O o	0.708	4.420	0.039	20.496	82.180
SiO2 o	1.510	9.420	0.025	13.097	175.145
Al2O3o	0.052	0.327	0.001	0.268	6.075
MgO o	0.414	2.581	0.010	5.349	47.985
CaO o	1.831	11.422	0.033	17.016	212.376
					----- (kg/thm)
Coke (in)	4.593	100.000	0.324	100.000	532.898
C c	3.558	77.450	0.296	91.559	412.730
H2O c	0.356	7.750	0.020	6.108	41.300
SiO2 c	0.048	1.050	0.001	0.248	5.595
Al2O3c	0.576	12.533	0.006	1.745	66.786
MgO c	0.015	0.322	0.000	0.114	1.717
CaO c	0.041	0.895	0.001	0.227	4.770
					----- (kg/thm)
All solid (in)	20.620	100.000	0.515	100.000	2392.182
C c	3.558	17.253	0.296	57.478	412.730
Fe2O3o	9.686	46.976	0.061	11.769	1123.751
Fe3O4o	0.306	1.485	0.001	0.257	35.512
FexO o	1.519	7.368	0.022	4.269	176.260
H2O o	0.708	3.435	0.039	7.629	82.180
SiO2 o	1.510	7.322	0.025	4.875	175.145
H2O c	0.356	1.726	0.020	3.834	41.300
SiO2 c	0.048	0.234	0.001	0.156	5.595
Al2O3o	0.052	0.254	0.001	0.100	6.075
MgO o	0.414	2.006	0.010	1.991	47.985
CaO o	1.831	8.878	0.033	6.334	212.376
Al2O3c	0.576	2.792	0.006	1.096	66.786
MgO c	0.015	0.072	0.000	0.071	1.717
CaO c	0.041	0.199	0.001	0.142	4.770
Scrap	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

----- (Nm <sup>3</sup> /thm)					
Blast (in)	14.809	100.000	0.514	100.000	1336.804
H <sub>2</sub> O g	0.009	0.061	0.000	0.097	1.299
O <sub>2</sub> g	3.288	22.203	0.103	19.986	267.179
N <sub>2</sub> g	11.512	77.737	0.411	79.916	1068.326
----- (kg/thm)					
Fines (in)	0.713	100.000	0.078	100.000	82.705
C f	0.496	69.519	0.041	52.599	57.496
Volats	0.125	17.476	0.036	45.691	14.453
Ash f	0.028	3.979	0.000	0.561	3.291
SiO <sub>2</sub> f	0.036	5.047	0.001	0.763	4.174
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> f	0.026	3.633	0.000	0.324	3.004
MgO f	0.001	0.092	0.000	0.021	0.076
CaO f	0.002	0.254	0.000	0.041	0.210
----- (Nm <sup>3</sup> /thm)					
Top Gas (out)	22.092	100.000	0.737	100.000	1917.253
CO g	3.571	16.165	0.127	17.292	331.525
CO <sub>2</sub> g	6.329	28.650	0.144	19.505	373.966
H <sub>2</sub> g	0.016	0.073	0.008	1.085	20.803
H <sub>2</sub> O g	1.186	5.369	0.066	8.928	171.179
O <sub>2</sub> g	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
N <sub>2</sub> g	10.988	49.739	0.392	53.187	1019.723
SiO g	0.001	0.004	0.000	0.003	0.057
----- (kg/thm)					
Fines (out)	0.355	100.000	0.029	100.000	41.132
C f	0.343	96.753	0.029	99.439	39.797
SiO <sub>2</sub> f	0.006	1.816	0.000	0.373	0.747
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> f	0.005	1.307	0.000	0.158	0.538
MgO f	0.000	0.033	0.000	0.010	0.014
CaO f	0.000	0.092	0.000	0.020	0.038
----- (kg/thm)					
Hot Metal (out)	8.620	100.000	0.190	100.000	1000.000
Fe l	8.003	92.849	0.143	75.485	928.490
C l	0.516	5.987	0.043	22.633	59.866
Si l	0.100	1.164	0.004	1.882	11.644
----- (kg/thm)					
Hot Slag (out)	4.183	100.000	0.071	100.000	485.311
FexO l	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
SiO <sub>2</sub> l	1.300	31.082	0.022	30.547	150.847
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> l	0.640	15.292	0.006	8.857	74.213
MgO l	0.419	10.017	0.010	14.675	48.615
CaO l	1.824	43.608	0.033	45.921	211.635
-----					

#### Liquid Mass Rates

=====	(kg/s)	(t/day)	(t/day/m <sup>3</sup> )
Metal	8.620	744.7	2.6428
Slag	4.183	361.4	1.2826
Total	12.803	1106.2	3.9253

# Global Elemental Balance (kg/s)

=====								
Component	Inflow				Outflow			
	Gas	Solid	Fines	Total	Gas	Liquid	Fines	Total
Fe	0.000	8.164	0.000	8.164	0.000	8.003	0.000	8.003
C	0.000	3.558	0.555	4.113	3.258	0.516	0.343	4.118
O	3.296	6.123	0.057	9.476	7.696	1.680	0.006	9.382
H	0.001	0.119	0.029	0.149	0.149	0.000	0.000	0.149
N	11.512	0.000	0.011	11.523	10.988	0.000	0.000	10.988
Si	0.000	0.728	0.017	0.745	0.001	0.708	0.003	0.712
Al	0.000	0.332	0.014	0.346	0.000	0.339	0.002	0.341
Ca	0.000	1.338	0.001	1.339	0.000	1.304	0.000	1.304
Mg	0.000	0.258	0.000	0.259	0.000	0.253	0.000	0.253
Total	14.809	20.620	0.713	36.142	22.092	12.803	0.355	35.249

# Global Enthalpy Balance (MW)

=====						
Type	In			Out		
	Thermal	Chemical	Sum	Thermal	Chemical	Sum
Gas	17.68	-0.12	17.56	2.04	-86.61	-84.57
Solid	0.00	-129.67	-129.67	-1.11		-1.11
Liquid				10.52	2.53	13.05
Slag				9.11	-42.62	-33.51
Fines	1.15	-5.30	-4.15	0.03	-0.45	-0.42
Solid to wall				-0.13		-0.13
Gas to wall				-0.14		-0.14
-----						
Sum totals	18.83	-135.09	-116.26	20.32	-127.14	-106.82
Error (In-Out)	-9.43					

## Perhitungan *mass balance* ukuran diameter kokas 48 mm

BF65 results using the CHEMISTRY model after 10000 iterations.

```
=====
Burden (specified) 25.00C 298.15K
Blast (specified) 1100.00C 1373.15K
PC (specified) 1100.00C 1373.15K
FO/flux (specified) 1100.00C 1373.15K
```

```
Hot metal (calculated) 1824.41C 2097.56K
Hot slag (calculated) 1823.85C 2097.00K
Top gas (calculated) 150.09C 423.24K
Top PC char (calculated) 192.78C 465.93K
Top FO/flux (calculated) 192.78C 465.93K
```

```
Rwy max. gas (calculated) 1887.48C 2160.63K
Rwy max. solid (calculated) 1915.76C 2188.91K
Ex-rwy gas (calculated) 1795.57C 2068.72K
```

# Miscellaneous

=====

Top gas pressure 1.137 atm (specified)  
 Tuyere pressure 1.871 atm (calculated)  
 Pressure drop 0.734 atm (calculated)  
 Blast velocity 1221.9 m/s  
 Burden velocity 1.52 mm/s  
 Coke rate 517.1 kg/thm  
 PC rate 77.0 kg/thm  
 NG rate 0.0 kg/thm  
 Fuel rate 594.1 kg/thm  
 ENRICHMENT = -1.01357491715888

## Summed reaction rates (kg/s)

=====

CO	g	In :	0.00	Out :	3.66	Error:	-0.01	Error/(In+Gen.):	-0.15%		
		ICHO :	-0.55	ICMO :	-0.85	ICW0 :	-2.61	ICHX :	0.00	ICMX :	0.00
		ICWX :	0.00	IO1C :	4.74	IO1F :	0.53	IOCO :	0.00	ISLC :	2.74
		ISLF :	0.00	IWGC :	0.42	IWGF :	0.00	IDR :	0.18	IWS :	-1.11
		IVS :	0.05	IQC :	0.15	IQM :	-0.09	ICS :	-0.07	IQSR :	0.07
		ISI :	0.05	IC10 :	0.00	IC1C :	0.00	IC20 :	0.00	IC2C :	0.00
		IC30 :	0.00	IC3C :	0.00	IC40 :	0.00	IC4C :	0.00		
CO2	g	In :	0.00	Out :	6.00	Error:	0.07	Error/(In+Gen.):	0.83%		
		ICHO :	0.87	ICMO :	1.33	ICW0 :	4.10	ICHX :	0.00	ICMX :	0.00
		ICWX :	0.00	IO2C :	0.06	IO2F :	0.01	IOCO :	0.00	ISLC :	-2.16
		ISLF :	0.00	IWS :	1.74	ICV :	0.16	IVS :	-0.03	IC1C :	0.00
		IC2C :	0.00	IC3C :	0.00	IC4C :	0.00				
H2	g	In :	0.00	Out :	0.02	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.09%		
		IHHO :	0.00	IHMO :	-0.01	IHW0 :	-0.09	IHHX :	0.00	IHMx :	0.00
		IHWX :	0.00	IOH2 :	0.00	IWGC :	0.03	IWGF :	0.00	IWS :	0.08
		IVS :	0.01	IC10 :	0.00	IC1C :	0.00	IC20 :	0.00	IC2C :	0.00
		IC30 :	0.00	IC3C :	0.00	IC40 :	0.00	IC4C :	0.00		
H2O	g	In :	0.01	Out :	1.14	Error:	-0.01	Error/(In+Gen.):	-0.24%		
		IHHO :	0.00	IHMO :	0.06	IHW0 :	0.84	IHHX :	0.00	IHMx :	0.00
		IHWX :	0.00	IEV0 :	0.68	IEVC :	0.34	IOH2 :	0.00	IWGC :	-0.27
		IWGF :	0.00	IWS :	-0.71	ICV :	0.19				
O2	g	In :	3.29	Out :	0.00	Error:	-0.03	Error/(In+Gen.):	-0.85%		
		IO1C :	-2.71	IO2C :	-0.04	IO1F :	-0.30	IO2F :	-0.01	IOCO :	0.00
		IOH2 :	0.00	ICV :	-0.26	IC10 :	0.00	IC20 :	0.00	IC30 :	0.00
		IC40 :	0.00								
N2	g	In :	11.51	Out :	11.10	Error:	0.43	Error/(In+Gen.):	3.71%		
		ICV :	0.01	IVS :	0.00						
SiO	g	In :	0.00	Out :	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.79%		
		IQM :	-0.14	ICS :	0.12	IQSR :	0.10	ISI :	-0.08		
CH4	g	In :	0.00	Out :	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%		
		IC10 :	0.00	IC1C :	0.00						
C2H6	g	In :	0.00	Out :	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%		
		IC20 :	0.00	IC2C :	0.00						
C3H8	g	In :	0.00	Out :	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%		
		IC30 :	0.00	IC3C :	0.00						
C4H10	g	In :	0.00	Out :	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%		
		IC40 :	0.00	IC4C :	0.00						

C	c	In	:	3.41	Out	:	0.00	Error:	-0.02	Error/(In+Gen.):	-0.61%
		ICD	:	-0.52	I01C	:	-2.03	I02C	:	-0.02	ISLC : -0.59 IWGC : -0.18
		IDR	:	-0.08	IQC	:	-0.09	IQM	:	0.04	ICS : 0.06 IQSR : -0.03
SiC	c	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-1.12%
		IQC	:	0.10	ICS	:	-0.11				
Fe203o		In	:	9.30	Out	:	0.00	Error:	-0.15	Error/(In+Gen.):	-1.60%
		ICHO	:	-9.45	IHHO	:	0.00				
Fe304o		In	:	0.29	Out	:	0.00	Error:	0.16	Error/(In+Gen.):	1.74%
		ICHO	:	9.14	ICMO	:	-8.31	IHHO	:	0.00	IHMO : -0.95
Fex0	o	In	:	1.46	Out	:	0.00	Error:	0.06	Error/(In+Gen.):	0.61%
		ICMO	:	7.83	ICWO	:	-6.43	IHMO	:	0.90	IHW0 : -3.22 IMW0 : -0.48
Fe	o	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	-0.03	Error/(In+Gen.):	-0.45%
		ICWO	:	4.94	IHW0	:	2.47	IMIO	:	-7.45	
H2O	o	In	:	0.68	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.02%
		IEVO	:	-0.68							
Slag	o	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		IMGO	:	0.00							
Si02	o	In	:	1.45	Out	:	0.00	Error:	0.01	Error/(In+Gen.):	0.56%
		IMS0	:	-1.44							
H2O	c	In	:	0.34	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.05%
		IEVC	:	-0.34							
Ash	c	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		IMGC	:	0.00							
Si02	c	In	:	0.05	Out	:	0.00	Error:	-0.01	Error/(In+Gen.):	-2.34%
		IMSC	:	-0.08	IQC	:	-0.16	IQM	:	0.19	
Al203o		In	:	0.05	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.75%
		IMAO	:	-0.05							
Mg0	o	In	:	0.40	Out	:	0.00	Error:	-0.01	Error/(In+Gen.):	-1.28%
		IMMO	:	-0.40							
Ca0	o	In	:	1.76	Out	:	0.00	Error:	-0.02	Error/(In+Gen.):	-1.05%
		IMCO	:	-1.78							
Al203c		In	:	0.55	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.57%
		IMAC	:	-0.56							
Mg0	c	In	:	0.01	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-1.07%
		IMMC	:	-0.01							
Ca0	c	In	:	0.04	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.86%
		IMCC	:	-0.04							
Fe	l	In	:	0.00	Out	:	7.96	Error:	-0.17	Error/(In+Gen.):	-2.20%
		IMIO	:	7.45	IMIX	:	0.00	IDR	:	0.34	
C	l	In	:	0.00	Out	:	0.51	Error:	-0.01	Error/(In+Gen.):	-2.41%
		ICD	:	0.52	ISI	:	-0.02				
Si	l	In	:	0.00	Out	:	0.05	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-7.28%
		ISI	:	0.05							
C	f	In	:	0.48	Out	:	0.24	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.85%
		I01F	:	-0.23	I02F	:	0.00	ISLF	:	0.00	IWGF : 0.00
Volats		In	:	0.12	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.37%
		ICV	:	-0.09	IVS	:	-0.03				
Ash	f	In	:	0.03	Out	:	0.00	Error:	0.03	Error/(In+Gen.):	100.00%
		IMGF	:	0.00							
Si02	f	In	:	0.03	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	1.62%
		IMSF	:	-0.03							
Al203f		In	:	0.02	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	1.62%
		IMAF	:	-0.02							

MgO	f	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	1.62%		
		IMMF	:	0.00									
CaO	f	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	1.62%		
		IMCF	:	0.00									
Fe2O3	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%		
		ICHX	:	0.00	IHHX	:	0.00						
Fe3O4	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%		
		ICHX	:	0.00	ICMX	:	0.00	IHHX	:	0.00	IHMx	:	0.00
FeO	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%		
		ICMX	:	0.00	ICWx	:	0.00	IHMx	:	0.00	IHWx	:	0.00
Fe	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%		
		ICWx	:	0.00	IHWx	:	0.00	IMIX	:	0.00			
Slag	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%		
SiO2	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%		
Al2O3	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%		
MgO	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%		
CaO	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%		
Fe	0	1	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.04	Error/(In+Gen.):	7.62%	
		IMWO	:	0.48	IMWX	:	0.00	IDR	:	-0.44			
Slag	1	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%		
		IMGO	:	0.00	IMGC	:	0.00	IMGF	:	0.00			
SiO2	1	In	:	0.00	Out	:	1.46	Error:	-0.04	Error/(In+Gen.):	-2.79%		
		IMSO	:	1.44	IMSC	:	0.08	IMSF	:	0.03	IQSR	:	-0.14
Al2O3	1	In	:	0.00	Out	:	0.65	Error:	-0.02	Error/(In+Gen.):	-3.21%		
		IMAO	:	0.05	IMAC	:	0.56	IMAF	:	0.02			
MgO	1	In	:	0.00	Out	:	0.44	Error:	-0.02	Error/(In+Gen.):	-4.32%		
		IMMO	:	0.40	IMMC	:	0.01	IMMF	:	0.00			
CaO	1	In	:	0.00	Out	:	1.89	Error:	-0.07	Error/(In+Gen.):	-4.01%		
		IMCO	:	1.78	IMCC	:	0.04	IMCF	:	0.00			
Fe2O3	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%		
		ICHX	:	0.00	IHHX	:	0.00						
Fe3O4	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%		
		ICHX	:	0.00	ICMX	:	0.00	IHHX	:	0.00	IHMx	:	0.00
FeO	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%		
		ICMX	:	0.00	ICWx	:	0.00	IHMx	:	0.00	IHWx	:	0.00
Fe	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%		
		ICWx	:	0.00	IHWx	:	0.00	IMIX	:	0.00			
Slag	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%		
SiO2	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%		
Al2O3	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%		
MgO	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%		
CaO	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%		

Stream Analyses	Mass Rate (kg/s)	Mass Frac. (%)	Mole Rate (kmol/s)	Mole Frac. (%)	Rate (kg/thm)
Ore (in)	15.393	100.000	0.184	100.000	1805.795
Fe2O3o	9.304	60.440	0.058	31.617	1091.423
Fe3O4o	0.294	1.910	0.001	0.689	34.491
FeO o	1.459	9.480	0.021	11.468	171.189
H2O o	0.680	4.420	0.038	20.496	79.816
SiO2 o	1.450	9.420	0.024	13.097	170.106



Al2O3o	0.050	0.327	0.000	0.268	5.900
MgO o	0.397	2.581	0.010	5.349	46.605
CaO o	1.758	11.422	0.031	17.016	206.266
----- (kg/thm)					
Coke (in)	4.408	100.000	0.310	100.000	517.059
C c	3.414	77.450	0.284	91.559	400.462
H2O c	0.342	7.750	0.019	6.108	40.072
SiO2 c	0.046	1.050	0.001	0.248	5.429
Al2O3c	0.552	12.533	0.005	1.745	64.801
MgO c	0.014	0.322	0.000	0.114	1.666
CaO c	0.039	0.895	0.001	0.227	4.629
----- (kg/thm)					
All solid (in)	19.801	100.000	0.495	100.000	2322.854
C c	3.414	17.240	0.284	57.457	400.462
Fe2O3o	9.304	46.986	0.058	11.776	1091.423
Fe3O4o	0.294	1.485	0.001	0.257	34.491
FexO o	1.459	7.370	0.021	4.272	171.189
H2O o	0.680	3.436	0.038	7.634	79.816
SiO2 o	1.450	7.323	0.024	4.878	170.106
H2O c	0.342	1.725	0.019	3.833	40.072
SiO2 c	0.046	0.234	0.001	0.156	5.429
Al2O3o	0.050	0.254	0.000	0.100	5.900
MgO o	0.397	2.006	0.010	1.992	46.605
CaO o	1.758	8.880	0.031	6.338	206.266
Al2O3c	0.552	2.790	0.005	1.095	64.801
MgO c	0.014	0.072	0.000	0.071	1.666
CaO c	0.039	0.199	0.001	0.142	4.629
Scrap	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
----- (Nm3/thm)					
Blast (in)	14.809	100.000	0.514	100.000	1351.738
H2O g	0.009	0.061	0.000	0.097	1.313
O2 g	3.288	22.203	0.103	19.986	270.164
N2 g	11.512	77.737	0.411	79.916	1080.260
----- (kg/thm)					
Fines (in)	0.684	100.000	0.075	100.000	80.234
C f	0.475	69.519	0.040	52.599	55.778
Volats	0.120	17.476	0.034	45.691	14.022
Ash f	0.027	3.979	0.000	0.561	3.192
SiO2 f	0.035	5.047	0.001	0.763	4.050
Al2O3f	0.025	3.633	0.000	0.324	2.915
MgO f	0.001	0.092	0.000	0.021	0.073
CaO f	0.002	0.254	0.000	0.041	0.204
----- (Nm3/thm)					
Top Gas (out)	21.917	100.000	0.734	100.000	1930.522
CO g	3.660	16.698	0.131	17.796	343.548
CO2 g	5.999	27.370	0.136	18.565	358.395
H2 g	0.015	0.071	0.008	1.045	20.179
H2O g	1.145	5.222	0.064	8.653	167.041
O2 g	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
N2 g	11.095	50.622	0.396	53.930	1041.133
SiO g	0.004	0.017	0.000	0.012	0.225

----- (kg/thm)					
Fines (out)	0.250	100.000	0.020	100.000	29.335
C f	0.244	97.493	0.020	99.569	28.600
SiO2 f	0.004	1.402	0.000	0.286	0.411
Al2O3f	0.003	1.009	0.000	0.121	0.296
MgO f	0.000	0.025	0.000	0.008	0.007
CaO f	0.000	0.071	0.000	0.015	0.021
----- (kg/thm)					
Hot Metal (out)	8.524	100.000	0.187	100.000	1000.000
Fe l	7.956	93.329	0.142	76.100	933.287
C l	0.514	6.028	0.043	22.856	60.277
Si l	0.055	0.644	0.002	1.043	6.436
----- (kg/thm)					
Hot Slag (out)	4.432	100.000	0.075	100.000	519.875
FexO l	0.000	0.001	0.000	0.000	0.003
SiO2 l	1.457	32.878	0.024	32.277	170.927
Al2O3l	0.648	14.628	0.006	8.463	76.049
MgO l	0.435	9.823	0.011	14.375	51.065
CaO l	1.891	42.670	0.034	44.885	221.831
-----					

#### Liquid Mass Rates

-----	(kg/s)	(t/day)	(t/day/m3)
Metal	8.524	736.5	2.6136
Slag	4.432	382.9	1.3587
Total	12.956	1119.4	3.9723

#### Global Elemental Balance (kg/s)

-----								
Component	Inflow				Outflow			
	Gas	Solid	Fines	Total	Gas	Liquid	Fines	Total
Fe	0.000	7.841	0.000	7.841	0.000	7.956	0.000	7.956
C	0.000	3.414	0.533	3.946	3.206	0.514	0.244	3.964
O	3.296	5.880	0.055	9.231	7.470	1.793	0.003	9.267
H	0.001	0.114	0.028	0.143	0.144	0.000	0.000	0.144
N	11.512	0.000	0.011	11.523	11.095	0.000	0.000	11.095
Si	0.000	0.699	0.016	0.716	0.002	0.736	0.002	0.740
Al	0.000	0.319	0.013	0.332	0.000	0.343	0.001	0.344
Ca	0.000	1.285	0.001	1.286	0.000	1.351	0.000	1.352
Mg	0.000	0.248	0.000	0.249	0.000	0.263	0.000	0.263
Total	14.809	19.801	0.684	35.294	21.917	12.956	0.250	35.124

#### Global Enthalpy Balance (MW)

-----						
Type	In			Out		
	Thermal	Chemical	Sum	Thermal	Chemical	Sum
Gas	17.68	-0.12	17.56	2.90	-83.45	-80.55
Solid	0.00	-124.54	-124.53	-1.18		-1.18
Liquid				10.43	2.44	12.88
Slag				9.67	-45.84	-36.17
Fines	1.10	-5.09	-3.98	0.04	-0.30	-0.26
Solid to wall				-0.12		-0.12
Gas to wall				-0.12		-0.12
-----						
Sum totals	18.79	-129.75	-110.96	21.64	-127.15	-105.52
Error (In-Out)	-5.44					

## Perhitungan *mass balance* ukuran diameter kokas 78 mm

BF65 results using the CHEMISTRY model after 10000 iterations.

```
=====
Burden (specified) 25.00C 298.15K
Blast (specified) 1100.00C 1373.15K
PC (specified) 1100.00C 1373.15K
FO/flux (specified) 1100.00C 1373.15K

Hot metal (calculated) 1824.71C 2097.86K
Hot slag (calculated) 1822.54C 2095.69K
Top gas (calculated) 198.36C 471.51K
Top PC char (calculated) 250.29C 523.44K
Top FO/flux (calculated) 250.29C 523.44K

Rwy max. gas (calculated) 1803.59C 2076.74K
Rwy max. solid (calculated) 1940.68C 2213.83K
Ex-rwy gas (calculated) 1750.96C 2024.11K
```

### Miscellaneous

```
=====
Top gas pressure 1.137 atm (specified)
Tuyere pressure 1.739 atm (calculated)
Pressure drop 0.602 atm (calculated)
Blast velocity 1315.1 m/s
Burden velocity 1.60 mm/s
Coke rate 525.8 kg/thm
PC rate 78.4 kg/thm
NG rate 0.0 kg/thm
Fuel rate 604.1 kg/thm
ENRICHMENT = -1.01357491715888
```

### Summed reaction rates (kg/s)

```
=====
CO g In : 0.00 Out : 3.83 Error: -0.07 Error/(In+Gen.): -0.84%
    ICHO : -0.53 ICMO : -0.85 ICWO : -2.62 ICHX : 0.00 ICMX : 0.00
    ICWX : 0.00 IO1C : 4.59 IO1F : 0.66 IOCO : 0.00 ISLC : 2.69
    ISLF : 0.00 IWGC : 0.39 IWGF : 0.00 IDR : 0.29 IWS : -0.96
    IVS : 0.05 IQC : 0.15 IQM : -0.13 ICS : -0.07 IQSR : 0.08
    ISI : 0.03 IC10 : 0.00 IC1C : 0.00 IC20 : 0.00 IC2C : 0.00
    IC30 : 0.00 IC3C : 0.00 IC40 : 0.00 IC4C : 0.00
CO2 g In : 0.00 Out : 5.77 Error: 0.08 Error/(In+Gen.): 1.00%
    ICHO : 0.84 ICMO : 1.33 ICWO : 4.12 ICHX : 0.00 ICMX : 0.00
    ICWX : 0.00 IO2C : 0.05 IO2F : 0.01 IOCO : 0.00 ISLC : -2.11
    ISLF : 0.00 IWS : 1.51 ICV : 0.13 IVS : -0.03 IC1C : 0.00
    IC2C : 0.00 IC3C : 0.00 IC4C : 0.00
H2 g In : 0.00 Out : 0.01 Error: 0.00 Error/(In+Gen.): -0.61%
    IHHO : 0.00 IHMO : -0.01 IHWO : -0.08 IHX : 0.00 IHMX : 0.00
    IHWX : 0.00 IOH2 : 0.00 IWGC : 0.03 IWGF : 0.00 IWS : 0.07
    IVS : 0.01 IC10 : 0.00 IC1C : 0.00 IC20 : 0.00 IC2C : 0.00
    IC30 : 0.00 IC3C : 0.00 IC40 : 0.00 IC4C : 0.00
```

H2O	g	In	:	0.01	Out	:	1.12	Error:	-0.02	Error/(In+Gen.):	-0.82%					
		IHHO	:	0.00	IHMO	:	0.06	IHW0	:	0.74	IHHX	:	0.00	IHMx	:	0.00
		IHWX	:	0.00	IEVO	:	0.67	IEVC	:	0.34	IOH2	:	0.00	IWGC	:	-0.25
		IWGF	:	0.00	IWS	:	-0.62	ICV	:	0.16						
O2	g	In	:	3.29	Out	:	0.00	Error:	0.02	Error/(In+Gen.):	0.62%					
		IO1C	:	-2.62	IO2C	:	-0.04	IO1F	:	-0.38	IO2F	:	-0.01	IOCO	:	0.00
		IOH2	:	0.00	ICV	:	-0.22	IC10	:	0.00	IC20	:	0.00	IC30	:	0.00
		IC40	:	0.00												
N2	g	In	:	11.51	Out	:	11.06	Error:	0.46	Error/(In+Gen.):	3.99%					
		ICV	:	0.01	IVS	:	0.00									
SiO	g	In	:	0.00	Out	:	0.01	Error:	-0.01	Error/(In+Gen.):	-4.18%					
		IQM	:	-0.20	ICS	:	0.12	IQSR	:	0.12	ISI	:	-0.04			
CH4	g	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%					
		IC10	:	0.00	IC1C	:	0.00									
C2H6	g	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%					
		IC20	:	0.00	IC2C	:	0.00									
C3H8	g	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%					
		IC30	:	0.00	IC3C	:	0.00									
C4H10	g	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%					
		IC40	:	0.00	IC4C	:	0.00									
C	c	In	:	3.38	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.08%					
		ICD	:	-0.51	IO1C	:	-1.97	IO2C	:	-0.01	ISLC	:	-0.58	IWGC	:	-0.17
		IDR	:	-0.12	IQC	:	-0.10	IQM	:	0.05	ICS	:	0.06	IQSR	:	-0.03
SiC	c	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-1.33%					
		IQC	:	0.11	ICS	:	-0.11									
Fe2O3	o	In	:	9.21	Out	:	0.00	Error:	0.12	Error/(In+Gen.):	1.28%					
		ICHO	:	-9.09	IHHO	:	0.00									
Fe3O4	o	In	:	0.29	Out	:	0.00	Error:	-0.12	Error/(In+Gen.):	-1.27%					
		ICHO	:	8.79	ICMO	:	-8.33	IHHO	:	0.00	IHMO	:	-0.86			
FexO	o	In	:	1.44	Out	:	0.00	Error:	0.08	Error/(In+Gen.):	0.78%					
		ICMO	:	7.85	ICWO	:	-6.46	IHMO	:	0.81	IHW0	:	-2.85	IMWO	:	-0.71
Fe	o	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	-0.06	Error/(In+Gen.):	-0.82%					
		ICWO	:	4.96	IHW0	:	2.19	IMIO	:	-7.21						
H2O	o	In	:	0.67	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.03%					
		IEVO	:	-0.67												
Slag	o	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%					
		IMGO	:	0.00												
SiO2	o	In	:	1.44	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.32%					
		IMSO	:	-1.43												
H2O	c	In	:	0.34	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.05%					
		IEVC	:	-0.34												
Ash	c	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%					
		IMGC	:	0.00												
SiO2	c	In	:	0.05	Out	:	0.00	Error:	-0.01	Error/(In+Gen.):	-3.49%					
		IMSC	:	-0.17	IQC	:	-0.16	IQM	:	0.27						
Al2O3	o	In	:	0.05	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.58%					
		IMAO	:	-0.05												
MgO	o	In	:	0.39	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.89%					
		IMMO	:	-0.40												
CaO	o	In	:	1.74	Out	:	0.00	Error:	-0.01	Error/(In+Gen.):	-0.77%					
		IMCO	:	-1.75												

Al2O3c	In	:	0.55	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.52%
	IMAC	:	-0.55							
MgO	c In	:	0.01	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.82%
	IMMC	:	-0.01							
CaO	c In	:	0.04	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.71%
	IMCC	:	-0.04							
Fe	1 In	:	0.00	Out	:	7.76	Error:	0.01	Error/(In+Gen.):	0.07%
	IMIO	:	7.21	IMIX	:	0.00	IDR	:	0.55	
C	1 In	:	0.00	Out	:	0.50	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.69%
	ICD	:	0.51	ISI	:	-0.01				
Si	1 In	:	0.00	Out	:	0.03	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-10.28%
	ISI	:	0.03							
C	f In	:	0.47	Out	:	0.14	Error:	0.05	Error/(In+Gen.):	9.82%
	IO1F	:	-0.29	IO2F	:	0.00	ISLF	:	0.00	INGF : 0.00
Volats	In	:	0.12	Out	:	0.00	Error:	0.02	Error/(In+Gen.):	15.12%
	ICV	:	-0.08	IVS	:	-0.02				
Ash	f In	:	0.03	Out	:	0.00	Error:	0.03	Error/(In+Gen.):	100.00%
	IMGF	:	0.00							
SiO2	f In	:	0.03	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	12.41%
	IMSF	:	-0.03							
Al2O3f	In	:	0.02	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	12.41%
	IMAF	:	-0.02							
MgO	f In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	12.41%
	IMMF	:	0.00							
CaO	f In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	12.41%
	IMCF	:	0.00							
Fe2O3x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
	ICHX	:	0.00	IHHX	:	0.00				
Fe3O4x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
	ICHX	:	0.00	ICMX	:	0.00	IHHX	:	0.00	IHMx : 0.00
FeO	x In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
	ICMX	:	0.00	ICWX	:	0.00	IHMx	:	0.00	IHWx : 0.00
Fe	x In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
	ICWX	:	0.00	IHWx	:	0.00	IMIX	:	0.00	
Slag	x In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
SiO2	x In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
Al2O3x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
MgO	x In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
CaO	x In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
FexO	1 In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.17%
	IMWO	:	0.71	IMWX	:	0.00	IDR	:	-0.71	
Slag	1 In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
	IMGO	:	0.00	IMGC	:	0.00	IMGF	:	0.00	
SiO2	1 In	:	0.00	Out	:	1.44	Error:	0.02	Error/(In+Gen.):	1.39%
	IMSO	:	1.43	IMSC	:	0.17	IMSF	:	0.03	IQSR : -0.17
Al2O3l	In	:	0.00	Out	:	0.62	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.10%
	IMAO	:	0.05	IMAC	:	0.55	IMAF	:	0.02	
MgO	1 In	:	0.00	Out	:	0.41	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.81%
	IMMO	:	0.40	IMMC	:	0.01	IMMF	:	0.00	
CaO	1 In	:	0.00	Out	:	1.78	Error:	0.02	Error/(In+Gen.):	0.84%
	IMCO	:	1.75	IMCC	:	0.04	IMCF	:	0.00	
Fe2O3x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
	ICHX	:	0.00	IHHX	:	0.00				

```

Fe304x In : 0.00 Out : 0.00 Error: 0.00 Error/(In+Gen.): 0.00%
          ICHX : 0.00 ICMX : 0.00 IHXX : 0.00 IHMX : 0.00
FeO x In : 0.00 Out : 0.00 Error: 0.00 Error/(In+Gen.): 0.00%
          ICMX : 0.00 ICWX : 0.00 IHMX : 0.00 IHWX : 0.00 IMWX : 0.00
Fe x In : 0.00 Out : 0.00 Error: 0.00 Error/(In+Gen.): 0.00%
          ICWX : 0.00 IHWX : 0.00 IMIX : 0.00
Slag x In : 0.00 Out : 0.00 Error: 0.00 Error/(In+Gen.): 0.00%
SiO2 x In : 0.00 Out : 0.00 Error: 0.00 Error/(In+Gen.): 0.00%
Al2O3x In : 0.00 Out : 0.00 Error: 0.00 Error/(In+Gen.): 0.00%
MgO x In : 0.00 Out : 0.00 Error: 0.00 Error/(In+Gen.): 0.00%
CaO x In : 0.00 Out : 0.00 Error: 0.00 Error/(In+Gen.): 0.00%

```

Stream Analyses	Mass Rate (kg/s)	Mass Frac. (%)	Mole Rate (kmol/s)	Mole Frac. (%)	Rate (kg/thm)
Ore (in)	15.238	100.000	0.182	100.000	1837.947
Fe2O3o	9.210	60.440	0.058	31.617	1110.855
Fe3O4o	0.291	1.910	0.001	0.689	35.105
FexO o	1.445	9.480	0.021	11.468	174.237
H2O o	0.674	4.420	0.037	20.496	81.237
SiO2 o	1.435	9.420	0.024	13.097	173.135
Al2O3o	0.050	0.327	0.000	0.268	6.005
MgO o	0.393	2.581	0.010	5.349	47.434
CaO o	1.741	11.422	0.031	17.016	209.938
----- (kg/thm)					
Coke (in)	4.359	100.000	0.307	100.000	525.783
C c	3.376	77.450	0.281	91.559	407.219
H2O c	0.338	7.750	0.019	6.108	40.748
SiO2 c	0.046	1.050	0.001	0.248	5.521
Al2O3c	0.546	12.533	0.005	1.745	65.894
MgO c	0.014	0.322	0.000	0.114	1.694
CaO c	0.039	0.895	0.001	0.227	4.707
----- (kg/thm)					
All solid (in)	19.597	100.000	0.489	100.000	2363.731
C c	3.376	17.228	0.281	57.437	407.219
Fe2O3o	9.210	46.996	0.058	11.783	1110.855
Fe3O4o	0.291	1.485	0.001	0.257	35.105
FexO o	1.445	7.371	0.021	4.274	174.237
H2O o	0.674	3.437	0.037	7.638	81.237
SiO2 o	1.435	7.325	0.024	4.881	173.135
H2O c	0.338	1.724	0.019	3.831	40.748
SiO2 c	0.046	0.234	0.001	0.156	5.521
Al2O3o	0.050	0.254	0.000	0.100	6.005
MgO o	0.393	2.007	0.010	1.993	47.434
CaO o	1.741	8.882	0.031	6.341	209.938
Al2O3c	0.546	2.788	0.005	1.095	65.894
MgO c	0.014	0.072	0.000	0.071	1.694
CaO c	0.039	0.199	0.001	0.142	4.707
Scrap	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
----- (Nm3/thm)					
Blast (in)	14.809	100.000	0.514	100.000	1389.874
H2O g	0.009	0.061	0.000	0.097	1.351
O2 g	3.288	22.203	0.103	19.986	277.786
N2 g	11.512	77.737	0.411	79.916	1110.737

----- (kg/thm)					
Fines (in)	0.677	100.000	0.074	100.000	81.601
C f	0.470	69.519	0.039	52.599	56.728
Volats	0.118	17.476	0.034	45.691	14.260
Ash f	0.027	3.979	0.000	0.561	3.247
SiO2 f	0.034	5.047	0.001	0.763	4.119
Al2O3f	0.025	3.633	0.000	0.324	2.964
MgO f	0.001	0.092	0.000	0.021	0.075
CaO f	0.002	0.254	0.000	0.041	0.208
----- (Nm3/thm)					
Top Gas (out)	21.813	100.000	0.732	100.000	1979.758
CO g	3.835	17.580	0.137	18.696	370.137
CO2 g	5.769	26.449	0.131	17.902	354.413
H2 g	0.014	0.064	0.007	0.943	18.660
H2O g	1.125	5.155	0.062	8.524	168.746
O2 g	0.000	0.002	0.000	0.002	0.035
N2 g	11.061	50.706	0.395	53.905	1067.184
SiO g	0.009	0.044	0.000	0.029	0.582
----- (kg/thm)					
Fines (out)	0.138	100.000	0.011	100.000	16.631
C f	0.136	98.938	0.011	99.820	16.454
SiO2 f	0.001	0.594	0.000	0.120	0.099
Al2O3f	0.001	0.427	0.000	0.051	0.071
MgO f	0.000	0.011	0.000	0.003	0.002
CaO f	0.000	0.030	0.000	0.006	0.005
----- (kg/thm)					
Hot Metal (out)	8.291	100.000	0.182	100.000	1000.000
Fe l	7.755	93.542	0.139	76.308	935.424
C l	0.505	6.087	0.042	23.091	60.870
Si l	0.031	0.371	0.001	0.601	3.707
----- (kg/thm)					
Hot Slag (out)	4.245	100.000	0.072	100.000	511.985
FexO l	0.000	0.001	0.000	0.001	0.005
SiO2 l	1.437	33.862	0.024	33.289	173.370
Al2O3l	0.620	14.596	0.006	8.457	74.731
MgO l	0.408	9.615	0.010	14.090	49.227
CaO l	1.780	41.925	0.032	44.163	214.652

#### Liquid Mass Rates

=====	(kg/s)	(t/day)	(t/day/m3)
Metal	8.291	716.3	2.5419
Slag	4.245	366.7	1.3014
Total	12.535	1083.0	3.8432

#### Global Elemental Balance (kg/s)

=====	Inflow				Outflow			
Component	Gas	Solid	Fines	Total	Gas	Liquid	Fines	Total
Fe	0.000	7.762	0.000	7.762	0.000	7.755	0.000	7.755
C	0.000	3.376	0.527	3.903	3.219	0.505	0.136	3.860
O	3.296	5.820	0.055	9.171	7.388	1.727	0.001	9.116
H	0.001	0.113	0.027	0.141	0.140	0.000	0.000	0.140
N	11.512	0.000	0.010	11.522	11.061	0.000	0.000	11.061

Si	0.000	0.692	0.016	0.708	0.006	0.703	0.000	0.709
Al	0.000	0.315	0.013	0.328	0.000	0.328	0.000	0.328
Ca	0.000	1.272	0.001	1.273	0.000	1.272	0.000	1.272
Mg	0.000	0.246	0.000	0.246	0.000	0.246	0.000	0.246
Total	14.809	19.597	0.677	35.082	21.813	12.535	0.138	34.486

#### Global Enthalpy Balance (MW)

Type	In			Out		
	Thermal	Chemical	Sum	Thermal	Chemical	Sum
Gas	17.68	-0.12	17.56	4.03	-81.83	-77.80
Solid	0.00	-123.27	-123.26	-1.21		-1.21
Liquid				10.16	2.34	12.50
Slag				9.25	-44.11	-34.85
Fines	1.09	-5.03	-3.94	0.03	-0.15	-0.12
Solid to wall				-0.10		-0.10
Gas to wall				-0.09		-0.09
Sum totals	18.78	-128.42	-109.64	22.08	-123.75	-101.68
Error (In-Out)	-7.97					

#### Perhitungan *mass balance* ukuran diameter kokas 118 mm

BF65 results using the CHEMISTRY model after 10000 iterations.

Burden (specified)	25.00C	298.15K
Blast (specified)	1100.00C	1373.15K
PC (specified)	1100.00C	1373.15K
FO/flux (specified)	1100.00C	1373.15K
Hot metal (calculated)	1824.98C	2098.13K
Hot slag (calculated)	1822.10C	2095.25K
Top gas (calculated)	250.96C	524.11K
Top PC char (calculated)	304.92C	578.07K
Top FO/flux (calculated)	304.92C	578.07K
Rwy max. gas (calculated)	1778.32C	2051.47K
Rwy max. solid (calculated)	1971.87C	2245.02K
Ex-rwy gas (calculated)	1717.44C	1990.59K

#### Miscellaneous

Top gas pressure	1.137 atm (specified)
Tuyere pressure	1.650 atm (calculated)
Pressure drop	0.513 atm (calculated)
Blast velocity	1385.7 m/s
Burden velocity	1.66 mm/s
Coke rate	522.3 kg/thm
PC rate	77.8 kg/thm
NG rate	0.0 kg/thm
Fuel rate	600.1 kg/thm
ENRICHMENT	= -1.01357491715888



# Summed reaction rates (kg/s)

CO	g	In	: 0.00	Out	: 4.09	Error:	-0.15	Error/(In+Gen.):	-1.59%		
		ICHO	: -0.53	ICMO	: -0.83	ICWO	: -2.48	ICHX	: 0.00	ICMX	: 0.00
		ICWX	: 0.00	IO1C	: 4.34	IO1F	: 0.88	IOCO	: 0.00	ISLC	: 2.43
		ISLF	: 0.00	IWGC	: 0.41	IWGF	: 0.00	IDR	: 0.47	IWS	: -0.86
		IVS	: 0.05	IQC	: 0.63	IQM	: -0.59	ICS	: -0.32	IQSR	: 0.29
		ISI	: 0.05	IC10	: 0.00	IC1C	: 0.00	IC20	: 0.00	IC2C	: 0.00
		IC30	: 0.00	IC3C	: 0.00	IC40	: 0.00	IC4C	: 0.00		
CO2	g	In	: 0.00	Out	: 5.64	Error:	0.03	Error/(In+Gen.):	0.39%		
		ICHO	: 0.84	ICMO	: 1.31	ICWO	: 3.89	ICHX	: 0.00	ICMX	: 0.00
		ICWX	: 0.00	IO2C	: 0.05	IO2F	: 0.01	IOCO	: 0.00	ISLC	: -1.91
		ISLF	: 0.00	IWS	: 1.36	ICV	: 0.16	IVS	: -0.03	IC1C	: 0.00
		IC2C	: 0.00	IC3C	: 0.00	IC4C	: 0.00				
H2	g	In	: 0.00	Out	: 0.01	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.06%		
		IHHO	: 0.00	IHMO	: -0.01	IHWO	: -0.08	IHHX	: 0.00	IHMX	: 0.00
		IHWX	: 0.00	IOH2	: 0.00	IWGC	: 0.03	IWGF	: 0.00	IWS	: 0.06
		IVS	: 0.01	IC10	: 0.00	IC1C	: 0.00	IC20	: 0.00	IC2C	: 0.00
		IC30	: 0.00	IC3C	: 0.00	IC40	: 0.00	IC4C	: 0.00		
H2O	g	In	: 0.01	Out	: 1.12	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.05%		
		IHHO	: 0.00	IHMO	: 0.06	IHWO	: 0.69	IHHX	: 0.00	IHMX	: 0.00
		IHWX	: 0.00	IEVO	: 0.66	IEVC	: 0.33	IOH2	: 0.00	IWGC	: -0.27
		IWGF	: 0.00	IWS	: -0.56	ICV	: 0.18				
O2	g	In	: 3.29	Out	: 0.01	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.13%		
		IO1C	: -2.48	IO2C	: -0.04	IO1F	: -0.50	IO2F	: -0.01	IOCO	: 0.00
		IOH2	: 0.00	ICV	: -0.26	IC10	: 0.00	IC20	: 0.00	IC30	: 0.00
		IC40	: 0.00								
N2	g	In	: 11.51	Out	: 10.72	Error:	0.80	Error/(In+Gen.):	6.96%		
		ICV	: 0.01	IVS	: 0.00						
SiO	g	In	: 0.00	Out	: 0.02	Error:	-0.08	Error/(In+Gen.):	-8.51%		
		IQM	: -0.93	ICS	: 0.50	IQSR	: 0.45	ISI	: -0.08		
CH4	g	In	: 0.00	Out	: 0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%		
		IC10	: 0.00	IC1C	: 0.00						
C2H6	g	In	: 0.00	Out	: 0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%		
		IC20	: 0.00	IC2C	: 0.00						
C3H8	g	In	: 0.00	Out	: 0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%		
		IC30	: 0.00	IC3C	: 0.00						
C4H10	g	In	: 0.00	Out	: 0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%		
		IC40	: 0.00	IC4C	: 0.00						
C	c	In	: 3.31	Out	: 0.00	Error:	0.01	Error/(In+Gen.):	0.17%		
		ICD	: -0.53	IO1C	: -1.86	IO2C	: -0.01	ISLC	: -0.52	IWGC	: -0.18
		IDR	: -0.20	IQC	: -0.41	IQM	: 0.25	ICS	: 0.27	IQSR	: -0.12
SiC	c	In	: 0.00	Out	: 0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.49%		
		IQC	: 0.45	ICS	: -0.45						
Fe2O3	o	In	: 9.04	Out	: 0.00	Error:	-0.08	Error/(In+Gen.):	-0.92%		
		ICHO	: -9.12	IHHO	: 0.00						
Fe3O4	o	In	: 0.29	Out	: 0.00	Error:	0.07	Error/(In+Gen.):	0.81%		
		ICHO	: 8.82	ICMO	: -8.16	IHHO	: 0.00	IHMO	: -0.87		
FeO	o	In	: 1.42	Out	: 0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.02%		
		ICMO	: 7.68	ICWO	: -6.11	IHMO	: 0.82	IHWO	: -2.66	IMWO	: -1.16

Fe	o	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.01	Error/(In+Gen.):	0.18%
		ICWO	:	4.69	IHWO	:	2.04	IMIO	:	-6.72	
H2O	o	In	:	0.66	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		IEVO	:	-0.66							
Slag	o	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		IMGO	:	0.00							
SiO2	o	In	:	1.41	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.34%
		IMSO	:	-1.40							
H2O	c	In	:	0.33	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.01%
		IEVC	:	-0.33							
Ash	c	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		IMGC	:	0.00							
SiO2	c	In	:	0.04	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.23%
		IMSC	:	-0.63	IQC	:	-0.68	IQM	:	1.26	
Al2O3	o	In	:	0.05	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		IMAO	:	-0.05							
MgO	o	In	:	0.39	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.16%
		IMMO	:	-0.39							
CaO	o	In	:	1.71	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.09%
		IMCO	:	-1.71							
Al2O3	c	In	:	0.54	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.01%
		IMAC	:	-0.54							
MgO	c	In	:	0.01	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.16%
		IMMC	:	-0.01							
CaO	c	In	:	0.04	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.10%
		IMCC	:	-0.04							
Fe	l	In	:	0.00	Out	:	7.62	Error:	-0.01	Error/(In+Gen.):	-0.15%
		IMIO	:	6.72	IMIX	:	0.00	IDR	:	0.89	
C	l	In	:	0.00	Out	:	0.50	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.08%
		ICD	:	0.53	ISI	:	-0.02				
Si	l	In	:	0.00	Out	:	0.06	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-7.06%
		ISI	:	0.05							
C	f	In	:	0.46	Out	:	0.07	Error:	0.01	Error/(In+Gen.):	2.94%
		IO1F	:	-0.38	IO2F	:	0.00	ISLF	:	0.00	IWGF : 0.00
Volats	In	:	0.12	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-1.60%	
		ICV	:	-0.09	IVS	:	-0.03				
Ash	f	In	:	0.03	Out	:	0.00	Error:	0.03	Error/(In+Gen.):	100.00%
		IMGF	:	0.00							
SiO2	f	In	:	0.03	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.83%
		IMSF	:	-0.03							
Al2O3	f	In	:	0.02	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.83%
		IMAF	:	-0.02							
MgO	f	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.83%
		IMMF	:	0.00							
CaO	f	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.83%
		IMCF	:	0.00							
Fe2O3	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		ICHX	:	0.00	IHHX	:	0.00				
Fe3O4	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		ICHX	:	0.00	ICMX	:	0.00	IHHX	:	0.00	IHMx : 0.00
FeO	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		ICMX	:	0.00	ICWX	:	0.00	IHMx	:	0.00	IHWx : 0.00 IMWx : 0.00

Fe	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		ICWX	:	0.00	IHWX	:	0.00	IMIX	:	0.00	
Slag	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
SiO2	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
Al2O3	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
MgO	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
CaO	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
FexO	l	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	-0.03%
		IMWO	:	1.16	IMWX	:	0.00	IDR	:	-1.16	
Slag	l	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		IMGO	:	0.00	IMGC	:	0.00	IMGF	:	0.00	
SiO2	l	In	:	0.00	Out	:	1.47	Error:	-0.01	Error/(In+Gen.):	-0.57%
		IMSO	:	1.40	IMSC	:	0.63	IMSF	:	0.03	IQSR : -0.61
Al2O3	l	In	:	0.00	Out	:	0.66	Error:	-0.05	Error/(In+Gen.):	-8.10%
		IMAO	:	0.05	IMAC	:	0.54	IMAF	:	0.02	
MgO	l	In	:	0.00	Out	:	0.42	Error:	-0.02	Error/(In+Gen.):	-5.10%
		IMMO	:	0.39	IMMC	:	0.01	IMMF	:	0.00	
CaO	l	In	:	0.00	Out	:	1.84	Error:	-0.09	Error/(In+Gen.):	-5.08%
		IMCO	:	1.71	IMCC	:	0.04	IMCF	:	0.00	
Fe2O3	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		ICHX	:	0.00	IHHX	:	0.00				
Fe3O4	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		ICHX	:	0.00	ICMX	:	0.00	IHHX	:	0.00	IHMx : 0.00
FeO	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		ICMX	:	0.00	ICWX	:	0.00	IHMx	:	0.00	IHWX : 0.00 IMWX : 0.00
Fe	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
		ICWX	:	0.00	IHWX	:	0.00	IMIX	:	0.00	
Slag	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
SiO2	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
Al2O3	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
MgO	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%
CaO	x	In	:	0.00	Out	:	0.00	Error:	0.00	Error/(In+Gen.):	0.00%

Stream Analyses	Mass Rate (kg/s)	Mass Frac. (%)	Mole Rate (kmol/s)	Mole Frac. (%)	Rate (kg/thm)
Ore (in)	14.953	100.000	0.179	100.000	1827.172
Fe2O3o	9.038	60.440	0.057	31.617	1104.343
Fe3O4o	0.286	1.910	0.001	0.689	34.899
FexO o	1.418	9.480	0.021	11.468	173.216
H2O o	0.661	4.420	0.037	20.496	80.761
SiO2 o	1.409	9.420	0.023	13.097	172.120
Al2O3o	0.049	0.327	0.000	0.268	5.970
MgO o	0.386	2.581	0.010	5.349	47.156
CaO o	1.708	11.422	0.030	17.016	208.708
----- (kg/thm)					
Coke (in)	4.274	100.000	0.301	100.000	522.278
C c	3.310	77.450	0.276	91.559	404.504
H2O c	0.331	7.750	0.018	6.108	40.477
SiO2 c	0.045	1.050	0.001	0.248	5.484
Al2O3c	0.536	12.533	0.005	1.745	65.455
MgO c	0.014	0.322	0.000	0.114	1.683
CaO c	0.038	0.895	0.001	0.227	4.675

----- (kg/thm)					
All solid (in)	19.227	100.000	0.480	100.000	2349.450
C c	3.310	17.217	0.276	57.420	404.504
Fe2O3o	9.038	47.004	0.057	11.789	1104.343
Fe3O4o	0.286	1.485	0.001	0.257	34.899
FeO o	1.418	7.373	0.021	4.276	173.216
H2O o	0.661	3.437	0.037	7.642	80.761
SiO2 o	1.409	7.326	0.023	4.883	172.120
H2O c	0.331	1.723	0.018	3.830	40.477
SiO2 c	0.045	0.233	0.001	0.156	5.484
Al2O3o	0.049	0.254	0.000	0.100	5.970
MgO o	0.386	2.007	0.010	1.994	47.156
CaO o	1.708	8.883	0.030	6.345	208.708
Al2O3c	0.536	2.786	0.005	1.094	65.455
MgO c	0.014	0.072	0.000	0.071	1.683
CaO c	0.038	0.199	0.001	0.142	4.675
Scrap	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
----- (Nm3/thm)					
Blast (in)	14.809	100.000	0.514	100.000	1408.018
H2O g	0.009	0.061	0.000	0.097	1.368
O2 g	3.288	22.203	0.103	19.986	281.412
N2 g	11.512	77.737	0.411	79.916	1125.237
----- (kg/thm)					
Fines (in)	0.663	100.000	0.073	100.000	81.058
C f	0.461	69.519	0.038	52.599	56.351
Volats	0.116	17.476	0.033	45.691	14.166
Ash f	0.026	3.979	0.000	0.561	3.225
SiO2 f	0.033	5.047	0.001	0.763	4.091
Al2O3f	0.024	3.633	0.000	0.324	2.945
MgO f	0.001	0.092	0.000	0.021	0.074
CaO f	0.002	0.254	0.000	0.041	0.206
----- (Nm3/thm)					
Top Gas (out)	21.612	100.000	0.727	100.000	1990.348
CO g	4.093	18.938	0.146	20.107	400.204
CO2 g	5.640	26.098	0.128	17.635	351.006
H2 g	0.015	0.067	0.007	0.990	19.707
H2O g	1.116	5.164	0.062	8.524	169.664
O2 g	0.007	0.033	0.000	0.031	0.618
N2 g	10.720	49.604	0.383	52.647	1047.863
SiO g	0.021	0.096	0.000	0.065	1.286
----- (kg/thm)					
Fines (out)	0.068	100.000	0.006	100.000	8.313
C f	0.068	99.700	0.006	99.949	8.288
SiO2 f	0.000	0.168	0.000	0.034	0.014
Al2O3f	0.000	0.121	0.000	0.014	0.010
MgO f	0.000	0.003	0.000	0.001	0.000
CaO f	0.000	0.008	0.000	0.002	0.001
----- (kg/thm)					
Hot Metal (out)	8.184	100.000	0.180	100.000	1000.000
Fe l	7.622	93.139	0.136	75.614	931.395
C l	0.504	6.160	0.042	23.256	61.600
Si l	0.057	0.700	0.002	1.131	7.005

------(kg/thm)					
Hot Slag (out)	4.385	100.000	0.074	100.000	535.823
FexO 1	0.000	0.002	0.000	0.001	0.009
SiO2 1	1.468	33.467	0.024	32.955	179.322
Al2O3 1	0.658	14.998	0.006	8.704	80.364
MgO 1	0.421	9.609	0.010	14.105	51.487
CaO 1	1.838	41.925	0.033	44.235	224.641
-----					

#### Liquid Mass Rates

=====	(kg/s)	(t/day)	(t/day/m3)
Metal	8.184	707.1	2.5091
Slag	4.385	378.9	1.3444
Total	12.569	1085.9	3.8535

#### Global Elemental Balance (kg/s)

=====								
Inflow					Outflow			
Component	Gas	Solid	Fines	Total	Gas	Liquid	Fines	Total
Fe	0.000	7.617	0.000	7.617	0.000	7.622	0.000	7.622
C	0.000	3.310	0.517	3.827	3.294	0.504	0.068	3.866
O	3.296	5.711	0.053	9.060	7.445	1.783	0.000	9.228
H	0.001	0.111	0.027	0.139	0.139	0.000	0.000	0.139
N	11.512	0.000	0.010	11.522	10.720	0.000	0.000	10.720
Si	0.000	0.679	0.016	0.695	0.013	0.743	0.000	0.757
Al	0.000	0.309	0.013	0.322	0.000	0.348	0.000	0.348
Ca	0.000	1.248	0.001	1.249	0.000	1.314	0.000	1.314
Mg	0.000	0.241	0.000	0.241	0.000	0.254	0.000	0.254
Total	14.809	19.227	0.663	34.700	21.612	12.569	0.068	34.249

#### Global Enthalpy Balance (MW)

=====						
In				Out		
Type	Thermal	Chemical	Sum	Thermal	Chemical	Sum
Gas	17.68	-0.12	17.56	5.26	-81.61	-76.35
Solid	0.00	-120.96	-120.95	-1.24		-1.24
Liquid				10.04	2.35	12.39
Slag				9.56	-45.29	-35.73
Fines	1.07	-4.94	-3.86	0.02	-0.07	-0.05
Solid to wall				-0.07		-0.07
Gas to wall				-0.08		-0.08
-----						
Sum totals	18.75	-126.01	-107.26	23.49	-124.63	-101.14
Error (In-Out)	-6.12					

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Penelitian pemodelan MBF dengan memvariasikan ukuran diameter kokas telah dilakukan untuk mendapatkan data-data prediksi eksperimen berdasarkan perhitungan dengan metode *finite volume method* dan berbagai persamaan fluida multidimensional. Dihasilkan data distribusi temperatur dengan nilai temperatur 1990°C, 2000°C, 2030°C, 2250°C berturut-turut untuk diameter 28 mm, 48 mm, 78 mm, 118 mm. Pada distribusi tekanan nilai *pressure drop* 0,93 atm; 0,75 atm; 0,63 atm; 0,54 atm berturut-turut untuk diameter 28 mm, 48 mm, 78 mm, 118 mm. Disimpulkan hal-hal yang didapatkan dari analisa numerik variasi diameter kokas pada MBF *Anyang Steel* yaitu.

1. Semakin besar ukuran kokas maka temperatur tertinggi MBF juga semakin bertambah tinggi karena adanya konsumsi energi pembentukan gas reduktor CO dari kokas yang lebih tinggi pada ukuran kokas yang rendah sehingga pada ukuran kokas yang lebih besar energi yang tidak dikonsumsi seperti pada ukuran kokas yang kecil dikonversi dalam bentuk energi panas.
2. Semakin besar ukuran kokas maka *pressure drop* yang dihasilkan semakin kecil karena pada ukuran diameter besar *voidage* yang terbentuk juga semakin besar sehingga hambatan blast mengalir ke atas semakin kecil.
3. Semakin besar ukuran kokas maka produktivitas MBF semakin turun disebabkan pada ukuran kokas kecil gas reduktor yang dihasilkan lebih banyak sehingga proses reduksi besi berjalan lebih cepat.
4. Konsumsi kokas fluktuatif dengan bertambahnya ukuran kokas dengan konsumsi terendah pada diameter 48 mm karena pada diameter 48 mm temperatur yang dibutuhkan untuk melelehkan *ore* dan gas reduktor CO yang terbentuk optimal.



## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

---

5. Semakin besar ukuran kokas maka semakin menurun efisiensi MBF dihitung dari gas keluar karena gas CO yang *loss* semakin banyak.
6. Waktu *residence* udara menurun demikian juga kecepatan blast meningkat seiring bertambahnya ukuran kokas dikarenakan ukuran *voidage* semakin besar.
7. Kecepatan *burden* semakin meningkat karena laju slag meningkat. Hal ini dikarenakan temperatur yang semakin meningkat lebih banyak melelehkan *ore* menjadi slag.
8. Ukuran kokas untuk proses yang optimal adalah 48 mm karena produktifitasnya yang cukup tinggi dengan konsumsi kokas yang paling rendah.

### 5.2 Saran

Untuk penelitian selanjutnya mengenai pemodelan diameter kokas maupun pemodelan *blast furnace* dengan variabel yang lain beberapa saran antara lain.

1. Untuk pemodelan diameter kokas sebaiknya diperhatikan mengenai perubahan ukurannya dari *stack* hingga ke *hearth* sehingga pemodelan fenomena lebih akurat.
2. Pemodelan diameter kokas sebaiknya memasukkan perhitungan faktor disintegrasi temperatur rendah kokas.
3. Perhitungan laju reaksi zat pengotor sebaiknya dimasukkan ke dalam permodelan.
4. Untuk mendapatkan keakuratan data sebaiknya dilakukan eksperimen MBF *Anyang* untuk mendapatkan data persentase FeO dalam slag, hal ini disebabkan pada permodelan tidak diperhitungkan berapa persen Fe yang menjadi FeO dalam slag.
5. Sebaiknya perhitungan laju reaksi pembentukan FeO didalam slag dimasukkan ke permodelan.
6. Sebaiknya diperhitungkan mengenai distribusi rentang ukuran kokas untuk realisasi eksperimen MBF.

## DAFTAR PUSTAKA

- Babich, A. and Aachen Institut für Eisenhüttenkunde, 2008.” *Ironmaking: textbook*”. RWTH.
- Biswas, A.K., 1982.” *Principles of blast furnace iron making*”, Cootha Publ. House, Brisbane, 189.
- Castro, Jose Adilson Ed. 2000.” *A Multi-Dimensional Transient Mathematical Model of Blast Furnace Base on Multi-Fluid Model*”. Tohoku University, Jepang.
- G.Danloy, J.Mignon, R. Munnix, G.Dauwels, L. Bonte, 2002. “ *A Blast Furnace Model to Optimize the Burden Distribution*”. Belgium.
- Geerdes, M., Toxopeus, H., & van der Vliet, C. 2009.” *Modern Blast Furnace Ironmaking: An Introduction*”. IOS Press.
- H. Nogami, Mansheng Chu, J. Yagi, 2006. “*Numerical analysis on blast furnace performance with novel feed material by multi-dimensional simulator based*”. mathematical modelling 30, Jepang.
- Ishiwata, N., Iwai, Y., Murai, R., Sawa, Y. and Sato, M., 2011.” *Effect of coke diameter and oxygen concentration of blast on cupola operation*”. ISIJ international, 51(8), pp.1353-1359.
- J. Yagi, H. Nogami, Aibing Yu, 2006. “*Multi-dimensional mathematical model of blast furnace based on multi-fluid theory and its application to develop super-high efficiency operations*”. international conference on CFD in the process industries, Australia.
- J Yagi, Hiroshi Nogami, Mansheng CHU, 2003.”*Numerical Analysis on Blast Furnace Performance Dimensional Transient Simulator Based on Multy-Fluid Theory*”.



international conference on CFD in the process industries, Australia.

Japan Keirin Association, 2010.”*Consulting Service Report for Improving the Efficiency of Carbonizing Plant for PKS Charcoal*”. Malaysia.

Kayama, N., Katsutoyo, N., dan Takamori T.1957. “*Effect of Coke Size on Cuploa Operation*”. The Journal Of The Japan Foundrymen's Society, 29(5), Pp.333-342.

Kitaev, B.I., Yaroshenko, Y.G. and Suchkov, V.D., 1957. “*Heat Transfer in Shaft Furnaces*”. Metallurgizdat, Sverdlovsk.

Kmieć, A., 1976. “*Some remarks on the Richardson-Zaki equation*”. The Chemical Engineering Journal, 11(3), pp.237-238.

Oscar Lingiardi, Oscar Burrai, Claudia Pertimo, F Giandomenico, Pedro Etchevarne, 2001. “*High Produktifitas and Coke rate Reduction at Siderar Blast Furnace*”. 1<sup>st</sup> International Meeting on Iron Making, Brasil.

Pandey, B., 2001. “*Metallics for Steelmaking: Production and Use*”. Allied Publishers.

Pardiarto, Bambang. 2011. “Peluang Bijih Besi Dalam Pemenuhan Kebutuhan Komoditas Mineral Strategis”. Pusat Sumber Daya Geologi, Bandung.

Rahmat, A. (2016). *Studi Desain Blast Furnace Kapasitas 5000 Ton/Hari Dengan Sumber Reduktan Arang Berbasis Pemodelan*. Surabaya: ITS.

S Natsui, Sigeru Ueda, Hirosi Nogami, J Kano, Ryou Inoue, 2011. “*Analysis on Non-Uniform Glas Flow in Blast Furnace Base on DEM-CFD Combine Model*”. Steel Research Int 82 No.8.

Sungging Pintowantoro, 2005.” *Fundamental Study of Powder Deposition in Blast Furnace Base on Multi-Fluid Theory*”. Tohoku University, Jepang.

- Teuku Ishlah, 2011.” Potensi Bijih Besi Indonesia Dalam Kerangka Pengembangan Klaster Industri Baja”. Pusat Sumber Daya Geologi, Bandung.
- Upadhyaya, S.G., Dube, K.R., .1977. “*Problems in Metallurgical Thermodynamics and Kinetics, 1<sup>st</sup> edition*”. Pergamon Press, Oxford.
- Wyllie, M.R.J. and Gardner, G.H.F., 1958. “*The generalized Kozeny-Carman equation*”. World Oil, 146(4), pp.121-128.
- Wonnacott, T.H. and Wonnacott, R.J., 1972.” *Introductory statistics (Vol. 19690)*”. New York: Wiley.
- Yansong Shen, Aibing Yu, P Austin, 2009. “*Paul Zulli, In-Furnace Modelling of Pulverized Coal Injection in an Ironmaking Blast Furnace: Effect of Key Variables On Gas Distribution*”, Australia.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap M. Hidayatullah Nur lahir di kota Parepare pada tanggal 17 Agustus 1993 dari ayah bernama M. Nur Makhmud dan ibu bernama Ros'aeni. Penulis adalah putra ke tiga dari empat bersaudara. Penulis menempuh pendidikan formal di SD Negeri 11 Parepare, lalu SMP Negeri 1 Parepare, lalu SMA Negeri 1 Parepare. Penulis melanjutkan pendidikan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI. Semasa

kuliah penulis aktif di berbagai kegiatan intra dan ekstra kampus antara lain pernah menjadi staf BSO MTC HMMT FTI-ITS 2013/2014, kemudian Direktur BSO MTC HMMT FTI-ITS 2014/2015, staf LDJ Ash Habul Kahfi JTMM 2013/2014 dan berbagai kegiatan kepanitiaan HMMT FTI-ITS. Penulis juga mendapatkan beberapa prestasi keilmiahan di lingkup nasional salah satunya peraih medali emas PIMNAS 28 di Unhalu, Sulawesi Tenggara. Selain itu penulis juga memiliki pengalaman kerja praktisi di PT. Vale Indonesia Tbk. dan ditempatkan di Divisi Proses Teknologi dan mengerjakan proyek khusus mengenai studi kelayakan penerapan pengayaan oksigen pada *converter* PT Vale Indonesia Tbk. Sebagai tugas akhir, penulis mengambil topik mengenai pemodelan ekstraksi.